Mémento du Gestionnaire de l'Alimentation en Eau et de l'Assainissement

Eau dans la ville

Alimentation en eau



LYONNAISE DES EAUX





Mémento du Gestionnaire de l'Alimentation en Eau et de l'Assainissement

Direction François Valiron

Préface de Jérôme Monod
Président Directeur Général de Lyonnaise des Eaux

Introduction de René Coulomb
Administrateur Directeur Général

Tome I

Eau dans la ville
Alimentation en eau

LONDRES  NEW YORK

PARIS

11, rue Lavoisier
F 75384 Paris Cedex 08

CHAPITRE II.3

LES RESSOURCES EN EAU ET LA GESTION DES PRÉLÈVEMENTS

1 CARACTÉRISTIQUE DE LA RESSOURCE EN EAU

Une société d'exploitation et de distribution d'eau s'intéresse nécessairement à sa matière première : la ressource en eau. Celle-ci peut se présenter sous plusieurs formes suivant qu'il s'agit d'eaux courantes (rivières), affleurantes (sources), superficielles (lacs), souterraines (eau de nappe).

1.1 Ressources en eau et pluie

Le mouvement de l'eau dans l'air, sur la terre et dans le sous-sol représente une des étapes du grand circuit du cycle global de l'eau.

Le cycle de l'eau se traduire par une équation représentant le bilan hydrologique :

$$P = E + R + I$$

La ressource est liée aux précipitations P, on la retrouve sous la forme : de ressource exploitable superficielle par le ruissellement R, de ressource souterraine par l'infiltration I. Une partie cependant nous échappe, reprise par l'évapotranspiration E.

Le cycle global commence par l'évaporation de l'eau qui, sous l'influence de l'énergie solaire, est transformée en vapeur d'eau. L'évaporation a lieu à partir des surfaces d'eau libre (océans, mers, lacs, fleuves) et de la végétation. Dans ce dernier cas, on parle de transpiration. Ces deux phénomènes, évaporation et transpiration, sont regroupés sous un seul terme : **l'évapotranspiration**. Dans un deuxième temps, cette vapeur se condense sous forme de nuages qui donnent naissance aux précipitations (pluies et neiges). Celles-ci représentent la quasi totalité des apports d'eau au sol *(figure II.3.1)*.

Trois processus interviennent alors :

– Une partie des précipitations s'écoule vers le réseau hydrographique et les surfaces d'eau libre : c'est le **ruissellement de surface**.

– Une autre partie s'infiltre dans le sous-sol et contribue à l'alimentation des eaux souterraines : c'est **l'infiltration**.

– Une dernière partie, enfin, **s'évapore et réintègre le cycle**. Dans le cas de la neige, l'évaporation a lieu sous forme de sublimation (passage de l'état solide à l'état gazeux).

On considère qu'en France, il y a une moyenne de 55 % d'évapotranspiration, 25 % de ruissellement et 20 % d'infiltration.

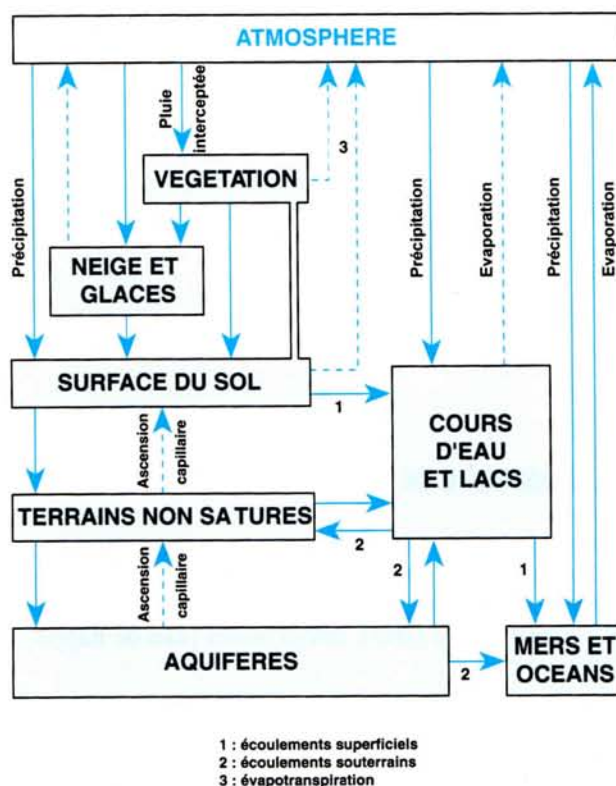


Figure II.3.1 — *Représentation schématique du cycle de l'eau (d'après Eagleson, 1970)*

Un système hydrologique est un système dynamique, séquence d'espace et de temps, fraction du cycle de l'eau. Il est identifié par des caractéristiques spatiales et temporelles. On distingue **trois types de systèmes hydrologiques** :
- le bassin hydrologique,
- le bassin hydrogéologique,
- l'aquifère.

Le bassin hydrologique est circonscrit par les lignes de crêtes topographiques, délimitant le bassin versant d'un cours d'eau et de ses affluents. La source unique d'alimentation du bassin hydrologique, supposé clos, provient des précipitations efficaces. Elles représentent la quantité d'eau fournie par les précipitations qui reste disponible à la surface du sol, après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle. Des formules empiriques ont été établies pour estimer les fuites par évapotranspiration potentielle ou réelle. Les plus utilisées sont celles de **Turc** et de **Thornthwaite**.

Le bassin hydrogéologique est la fraction de l'espace du bassin hydrologique située sous la surface du sol. C'est le domaine des eaux souterraines. Ses limites sont imposées par la structure géologique. L'alimentation du bassin hydrogéologique se fait par infiltration des précipitations efficaces.

L'aquifère, identifié par son contexte géologique, est l'unité de domaine d'étude des eaux souterraines. Le bassin hydrogéologique est constitué d'un ou plusieurs aquifères. L'aquifère est alimenté par l'infiltration efficace, c'est-à-dire la quantité d'eau qui parvient à la nappe.

Toutes les données relatives à un système considéré doivent être rapportées à une date donnée ou à une durée moyenne déterminée, en général annuelle. Le traitement des données doit répondre à deux conditions impératives :

– période hydrologique la plus longue possible, choisie en rapport avec la durée de l'historique des mesures (dix ans minimum),

– fréquence la plus courte possible, compatible avec celle des mesures (quotidienne, hebdomadaire, mensuelle ou annuelle).

L'exploitation d'un captage d'eau souterraine introduit un certain nombre de perturbations dans le régime hydrodynamique de la nappe. Il est important de les connaître parfaitement afin de déterminer les principales caractéristiques de l'ouvrage. Toutefois, avant d'étudier l'effet de ces perturbations, il convient d'élucider aussi complètement que possible le régime initial. Ceci exige que la connaissance de la surface piézométrique soit complétée par une estimation des débits et un véritable bilan des eaux entrant ou sortant de la nappe.

1.1.1 Les ressources en eau souterraine

Les eaux souterraines restent encore méconnues, mal comprises et sujettes à beaucoup d'idées fausses dans la culture générale.

On sait aujourd'hui que les eaux souterraines forment la quasi-totalité des stocks d'eau liquide présents globalement sur les terres émergées (98 à 99 %). Leur exploitation actuelle à l'échelle de la planète est de l'ordre de 600 à 700 milliards de mètres cubes d'eau par an.

On compte en France environ 200 aquifères d'importance régionale, dont 25 sont captifs. A l'exception de ces derniers, les nappes sont alimentées directement par l'infiltration efficace ou par les rivières connectées. On estime que ces aquifères renferment 2 000 milliards de mètres cubes d'eau dont 100 milliards s'écoulent annuellement. Ceci donne une idée de l'importance économique de l'eau souterraine pour notre pays. On puise en France 7 milliards de mètres cubes par an, dont 50 % pour l'eau potable, couvrant ainsi 60 % des besoins de la population mais aussi 19,7 % des besoins de l'irrigation et 25,8 % de ceux de l'industrie.

1.1.2 Echanges rivières-nappes

En France, près de la moitié des volumes d'eau souterraine prélevés proviennent d'aquifères alluviaux. Dans les champs captants importants situés à faible distance des cours d'eau, la part d'eau provenant de la rivière est largement prépondérante (de l'ordre de 60 à 90 % du volume). **La qualité de l'eau du cours d'eau qui alimente la nappe est donc déterminante** pour la qualité de celle de l'aquifère exploité. L'influence d'un cours d'eau sur l'alimentation d'un aquifère alluvial dépend fortement de l'exploitation de celui-ci. En effet :

– en régime naturel l'aquifère alluvial reçoit de l'eau souterraine par les versants de la vallée ainsi que par son impluvium. Cette eau, à l'exception de courtes périodes de crues, est ensuite drainée par le cours d'eau ;

– en régime influencé par des pompages, la dépression piézométrique créée par le cône d'influence du pompage appelle de l'eau de la rivière et inverse localement les écoulements. L'eau pompée provient d'un mélange d'eau souterraine au sens strict et d'eau de rivière ayant séjourné plus ou moins longtemps dans l'aquifère.

L'expérience prouve que **l'eau de la rivière qui a percolé à travers les berges** plus ou moins colmatées de son lit puis traversé un filtre naturel de plusieurs dizaines, voire centaines de mètres d'alluvions, **s'est, en général, profondément modifiée sous l'action de phénomènes physiques, chimiques et biologiques complexes**. Ces modifications vont souvent **dans le sens d'une amélioration de la qualité**. « L'effet de berge », terme regroupant les phénomènes physico-chimiques et biologiques qui conditionnent ces transformations, a fait l'objet d'études importantes dans les années 90 (**Doussan C., Detay M., Poitevin G.** [réf. 1, 2 et 3]).

Ils peuvent se résumer à une activité biochimique très importante dans les premiers centimètres de boues de rivière ainsi qu'une épuration notable dans les premiers mètres de berge. Dans un premier temps, une réduction biologique anaérobie produit des quantités importantes de sulfures, phosphore, fer, manganèse et surtout d'ammoniaque (ammonification de l'azote organique liée à des matières en suspension). Toutefois, une dénitrification extrêmement rapide a également lieu. Dans un deuxième temps, le rôle épurateur des alluvions est sollicité et permet une réduction importante des concentrations des éléments préalablement mis en solution. On note que certains polluants tels que les pesticides atrazine-simazine traversent assez facilement le réacteur berge ; ce phénomène est cependant variable et trouve son explication dans la complexité hydraulique des systèmes aquifères.

1.1.3 Echanges inter-nappes

Classiquement le toit ou le substratum (ou les deux) d'une nappe sont souvent constitués par une formation géologique semi-perméable. Celle-ci permet, dans certaines conditions hydrodynamiques favorables (différence de charge) des échanges d'eau avec l'aquifère superposé ou sous-jacent. Ce phénomène répond au nom de **drainance**.

L'importance du mécanisme de drainance repose sur le fait que des débits importants peuvent traverser des horizons imperméables ou semi-perméables lorsque la superficie de cet horizon est grande et qu'il existe des différences de pression de part et d'autre de cet horizon.

Ce phénomène est également responsable de transferts de masse et, en terme de bilan de matière, on démontre que la drainance est un mécanisme extrêmement puissant. **Ce mécanisme impose de reconsidérer avec une grande prudence les notions de couverture et d'imperméabilité**.

1.2 Variabilité des ressources en quantité

La variabilité des Ressources est liée principalement à celle de la pluviométrie amplifiée par celle de l'évapotranspiration, fonction de l'insolation et de l'utilisation des sols *(tableau II.3.1)*.

Tableau II.3.1 — *Variabilité de la ressource, d'après données du ministère de l'Environnement*

	Pluie P	Evapotranspiration	Pluie efficace
58-67	945	537	408
Année moyenne	800	500	300
Année sèche décennale	600	400	200

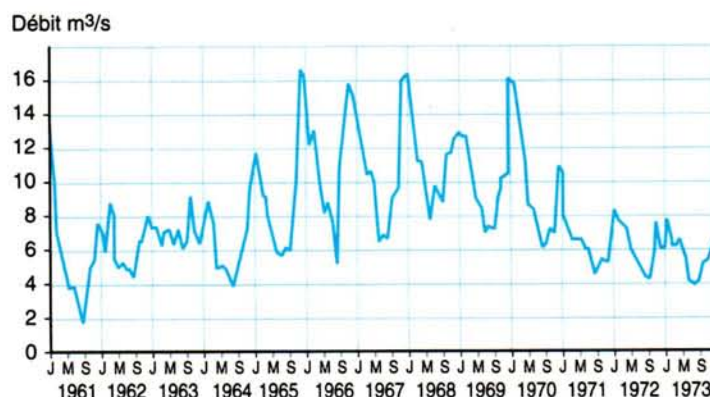


Figure II.3.2 — *Débits mensuels moyens du Thérain, affluent de l'Oise, à comparer au débit interanuel 1961/1973 de 8 m³/s qui correspond à une pluie efficace de 210 mm*

L'importance du bassin versant et son hétérogénéité atténue ces fluctuations en jouant un certain rôle régulateur pour les rivières, ce que montre bien le tableau II.3.2 synthétisant les bilans des écoulements des différents bassins.

Tableau II.3.2 — *Synthèse des éléments des bilans interannuels de la France (période 1958-1967)*

Bassins	Superficie (km²)	Ecoulement total Q 10⁶ m³/an	Q mm	Q l/s km²	Précipitations F 10⁶ m³/an	F mm	F l/s km²	Déficit d'écoulement ou évapotranspiration réelle D 10⁶ m³/an	D mm	D l/s km²
Bassin de l'Adour	12 861	8 335	648	20,5	15 404	1 198	38,0	7 069	550	17,4
Bassin de la Dordogne I	17 150	10 205	595	18,9	19 943	1 163	36,9	9 738	568	18,0
Bassin des fleuves côtiers Manche – Mer du Nord	11 736	3 335	284	9,0	9 108	776	24,6	5 773	492	15,6
Bassins des fleuves côtiers Atlantique	15 949	5 691	357	11,3	13 532	848	26,9	7 841	491	15,6
Bassins des fleuves côtiers Méditerranée	10 373	5 458	526	16,7	10 319	995	31,6	4 861	469	14,9
Bassin de la Garonne	42 120	19 523	464	14,7	43 242	1 027	32,6	23 719	563	17,9
Bassin de la Loire	98 926	25 381	257	8,1	82 695	836	26,5	57 314	579	18,4
Bassins du Rhin et de la Meuse	22 439	9 362	417	13,2	21 509	959	30,4	12 147	542	17,2
Bassin du Rhône	75 659	47 210	624	19,8	83 665	1 106	35,1	36 455	482	15,3
Bassin de la Seine	52 710	12 266	233	7,4	40 806	774	24,5	28 540	541	17,1
Total des bassins jaugés	359 923	146 766	408	12,9	340 223	945	29,9	193 457	537	17,0
Extrapolation à la totalité du territoire français	551 500	225 000	408	13,0	520 000	945	30,0	295 000	537	17,0

Cependant, les débits d'une source et d'une rivière et le niveau piézométrique d'une nappe varient tous les jours. La figure II.3.2 fait ressortir les variations saisonnières et inter-annuelles et la figure II.3.3 avec une échelle plus réduite, le cycle des années sèches ou humides.

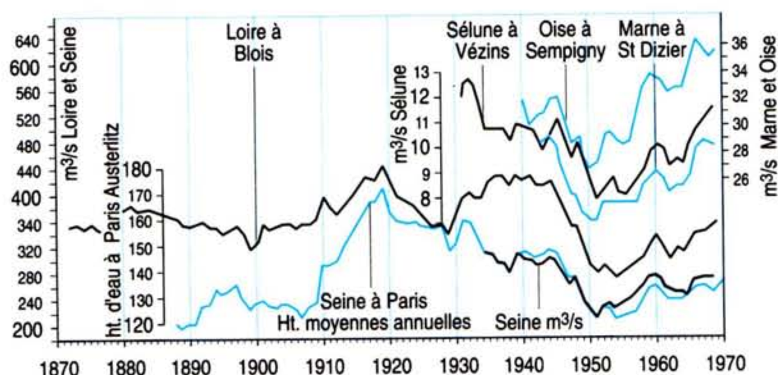


Figure II.3.3 — *Evolution historique de l'écoulement (moyennes décennales glissantes)*

1.3 Fluctuations de la qualité

La qualité de l'eau dans la rivière ou dans la nappe dépend de la teneur des très nombreux éléments chimiques, dissous ou en suspension, qu'elle contient, ainsi que de quelques paramètres physiques comme sa température, sa résistivité, son aspect (transparence) et sa saveur.

On a vu que l'on pouvait synthétiser cette qualité par quelques paramètres en nombre plus réduits, tels que teneur en matières en suspension, en matières oxydables, ...

En France, les eaux de surface ne sont pratiquement jamais aptes naturellement à la consommation humaine. Au contraire les eaux souterraines peuvent souvent, lorsque la nappe est suffisamment bien protégée, être délivrées au public sans traitement.

Le vieux débat visant à dégager les avantages et les inconvénients des choix eau superficielle-eau souterraine reste d'actualité. D'une part les traiteurs d'eau savent rendre potables toutes sortes d'eaux, et d'autre part, la législation sur les eaux souterraines et la méconnaissance de l'hydraulique souterraine rendent actuellement sa mise en œuvre extrêmement compliquée.

L'eau superficielle est très liée aux précipitations, donc très sensible aux pollutions par lessivage des sols. L'eau souterraine est soumise à une dynamique plus faible et l'existence de nombreux filtres physico-chimiques et biologiques aux interfaces lui garantit une qualité constante. Par contre, en cas de pollution accidentelle, elle sera évacuée très rapidement pour des eaux superficielles et beaucoup plus lentement en cas d'eaux souterraines.

2 PRÉLÈVEMENTS ET PROTECTION DES EAUX DE SURFACE

2.1 Les ouvrages de prélèvement de surface

On distingue deux grands types d'ouvrages de prélèvement de surface selon qu'ils captent des eaux en surface ou au fond d'un cours d'eau ou d'un lac. Dans le premier cas il convient de mettre en place des équipements de

dégrillage de manière à éliminer les objets flottants *(photo II.3.1)*. Dans le cas d'un captage en profondeur un microtamisage est généralement suffisant (on retient généralement une vitesse de 15 cm/s maximum dans les crépines). Dans les deux cas un système de nettoyage adapté est indispensable.

2.2 Le contrôle des prélèvements

L'exploitation devra tout d'abord rester en **contact étroit avec les autorités chargées de la gestion globale de la ressource ou de la police des eaux**. Ce sont en général celles qui lui ont donné l'autorisation de prélever dans la rivière, le barrage ou la retenue.

Cette autorisation fixe toujours un débit maximum de prélèvement, éventuellement le nombre d'heures de pompage par jour (ou un volume journalier) et donne des indications sur les restrictions possibles en cas d'étiage sévère. Elle indique parfois la classe de qualité que l'on peut espérer au pire pour cette ressource pendant n jours par an (330 à 350 jours/an). **Elle impose certains moyens de mesure (débit) et la tenue de documents statistiques.**

2.2.1 Suivi instantané des prélèvements

Le contrôle minimum doit porter évidemment sur la possibilité du prélèvement, compte tenu des prescriptions de l'autorisation.

Le poste de mesure comporte généralement un enregistrement de hauteur, des enregistreurs de température, de résistivité, d'oxygène dissous, un détecteur d'hydrocarbures, etc. Il doit être situé à proximité de l'ouvrage de captage et placé en un point qui ne perturbe pas le pompage.

2.2.2 Prévision des possibilités de prélèvement

Pour sa prévision à court et moyen termes sur les disponibilités en eau, l'exploitant a intérêt à rassembler une série de données :

– Par exemple, pour le moyen terme, le niveau et le stock d'eau disponible des retenues de barrages contrôlant le débit de la rivière sur lequel il puise.

– Pour le court terme, à ces éléments peut s'ajouter un suivi systématique de la pluviométrie en certains points stratégiques. L'exploitant peut se limiter à une collecte journalière de ces dernières données pendant les périodes de risque (sécheresse ou inondation) mais il doit prévoir la tenue des graphiques et leurs interprétations de façon permanente.

Les prévisions concernant la qualité sont beaucoup plus difficiles à partir de la collecte des données spécifiques. On peut par contre rechercher et exploiter des corrélations entre le débit de la rivière et ses teneurs en différents polluants, et se servir de graphiques mesurant l'évolution dans le temps de la teneur en différents éléments.

L'ensemble de ces données utiles à la prévision quantitative et qualitative proviennent de celles que peuvent fournir les services compétents (météo, service hydrologique, etc.) et de l'exploitation de celles mesurées directement par l'exploitant.

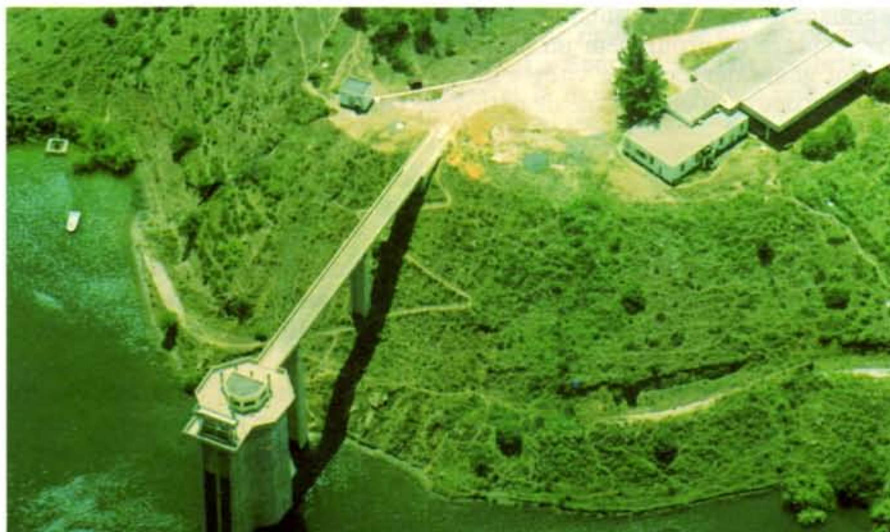


Photo II.3.1 — *Prise d'eau du barrage du Bou Regreg (Maroc), document Safège*

2.2.3 Station d'observation de la qualité des eaux

Pour déclencher une alerte éventuelle, il s'agit de disposer de données décrivant la ressource qu'on aura à utiliser quelques heures plus tard. Dans ce cas, le poste de mesure doit donc être placé sur la rivière en amont de la prise d'eau, à une distance correspondant à un décalage de quelques heures pour l'arrivée de la tranche mesurée *(photo II.3.2)*. Les éléments mesurés par capteurs sont en général relatifs à la qualité (O_2, température, résistivité). Ils sont transmis par une liaison filaire à l'usine de traitement. Parfois, on cherche à déceler des pollutions toxiques par la réaction de poissons-test (truites) maintenus dans des bacs alimentés par l'eau de rivière *(chapitre IV.5)*.



Photo II.3.2 — *Prise d'eau en rivière pour une station d'alerte*

2.2.4 Utilité de ces contrôles pour le traitement

Les mesures faites par l'exploitant sur l'eau qu'il prélève (débit – qualité) servent à la fois à remplir les obligations imposées par l'autorisation, et à la bonne gestion de ses installations de production.

L'établissement de corrélations entre la qualité de l'eau prélevée (O_2, pH, température, turbidité, NH_4^+, etc.) et les données techniques du traitement (doses des réactifs, colmatage des filtres, qualité de l'eau traitée) permet à l'exploitant de mieux prévoir l'organisation du traitement (doses de réactifs, colmatage des filtres, qualité de l'eau traitée). La compilation de ces informations permet d'optimiser l'organisation du service production, de déterminer les stocks de produits et de mieux appréhender le coût prévisionnel de fonctionnement (**Brodard** [réf. 4]).

La collecte de ces données est à la base d'une bonne gestion et du déclenchement des programmes d'entretien.

2.2.5 Action éventuelle sur la demande

En cas d'alerte due par exemple à une pollution accidentelle, ou à une pénurie naturelle de la ressource, l'exploitant doit utiliser les moyens divers mis en place d'avance pour faire face à ces risques.

Il aura à agir après une analyse de la situation lui permettant d'évaluer la durée de la période anormale. En fonction de celle-ci, il mettra d'abord en œuvre les moyens techniques prévus.

En complément de ces moyens, ou pour faire face à une situation particulièrement grave par sa durée ou l'importance de la pénurie, il convient d'envisager :

– Une réduction de la consommation avec l'aide des usagers par une campagne d'information.

– La gestion de la pénurie par l'organisation de coupures tournantes par secteur.

– Une réduction de la pression de service qui permet de réduire les fuites et limite la consommation, mais privilégie systématiquement les points bas du réseau.

3 PROTECTION DES PLANS D'EAUX

Les lacs et retenues constituent une composante importante de l'environnement, tant en zones rurales qu'urbaines. Les usages ludiques et surtout la fourniture d'eau brute de potabilisation font par ailleurs l'objet d'exigences qualitatives croissantes de la part des utilisateurs.

Deux maux, fréquemment associés, guettent ou affectent déjà nombre de plans d'eau : **l'eutrophisation**, d'une part, dans l'acception usuelle de croissances estivales anarchiques du phytoplancton dans la zone superficielle éclairée (dite épilimnion) et, d'autre part, la **désoxygénation des eaux profondes (zone désignée par le terme d'hypolimnion)** qui sont le siège de l'activité des décomposeurs. Confronté à ces problèmes, le gestionnaire du milieu naturel doit agir vite afin de satisfaire les demandes pressantes des utilisateurs. La réduction des apports de pollution reste la solution à long terme la plus raisonnable, mais son efficacité n'apparaît pas rapidement.

Des moyens curatifs produisant des résultats immédiats et permettant d'attendre les effets des mesures préventives s'avèrent donc nécessaires.

3.1 Les mécanismes responsables de la dégradation

L'urbanisation croissante, comme le développement industriel de l'après guerre ont entraîné une pollution massive des eaux superficielles et des plans d'eau en particulier. Les premiers effets en furent ressentis au début des années 1960. D'importants programmes de réduction des pollutions furent alors mis en œuvre. L'ampleur de la tâche était telle qu'il reste encore aujourd'hui beaucoup à faire pour éliminer certaines formes de pollution (N et P, pollutions diffuses, etc.).

L'eutrophisation est responsable :

– de problèmes de goût et odeur pour la production d'eau potable,
– de la diminution de la diversité et de la qualité piscicole,
– entrave et gêne les activités de loisir.

De nombreux facteurs interviennent dans ce phénomène *(figure II.3.4)* : les apports du bassin versant, la morphométrie du plan d'eau, la stabilité thermique du plan d'eau, les processus biologiques et chimiques notamment.

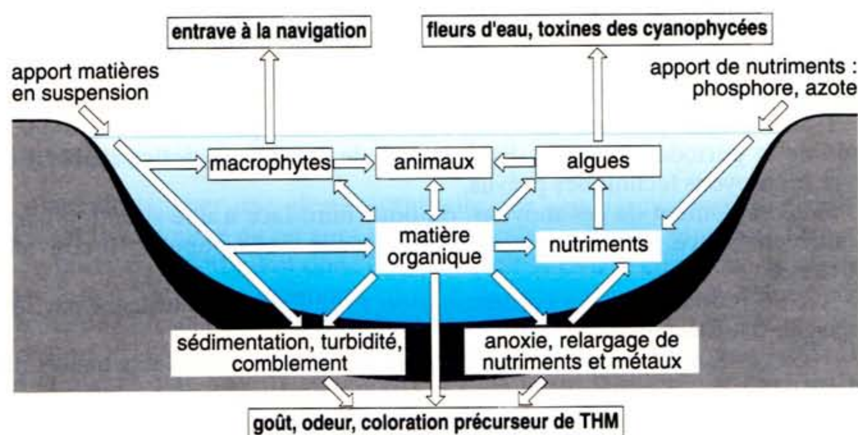


Figure II.3.4 — *Schéma des interactions au sein des lacs et plans d'eau, d'après document Aqua Technique*

3.1.1 Rappel du bilan simplifié des apports externes de phosphore aux lacs et retenues

Le rôle déterminant du phosphore dans l'eutrophisation est un principe acquis tant en ce qui concerne l'évolution naturelle du phénomène que son traitement.

Les caractéristiques principales des apports en phosphore aux plans d'eau alimentés par des bassins versants majoritairement agricoles appellent les remarques suivantes, en termes de gestion de la qualité :

– la charge phosphorée prédominante de période humide est difficile à contrôler, par suite de son origine diffuse ;

– la réduction de la charge phosphorée provenant des bassins versants (dite « charge externe ») en période estivale confère souvent un rôle prédominant à la charge interne (relargage par les sédiments de ce composé), vis-à-vis de la production primaire ;

– le phosphore résiduel apporté à l'étiage par les tributaires n'est pas négligeable car une bonne part est directement assimilable par les organismes phytoplanctoniques.

3.1.2 La désoxygénation estivale de la colonne d'eau

A la fois cause et conséquence de l'eutrophisation la désoxygénation constitue un élément déterminant de la qualité du milieu aquatique.

Les plans d'eau dont la profondeur dépasse quelques mètres sont presque systématiquement désoxygénés du printemps jusqu'à l'automne par les matières réductrices de la colonne d'eau et les matières réductrices des sédiments.

Outre ces causes internes, le fonctionnement des lacs et réservoirs explique l'apparition de l'anoxie :

– réduction de la réaération superficielle par suite du caractère « dormant » des eaux ;

– réduction de la diffusion verticale de l'oxygène dissous par suite de l'apparition d'une stratification thermique dans la masse d'eau *(figure II.3.5)*.

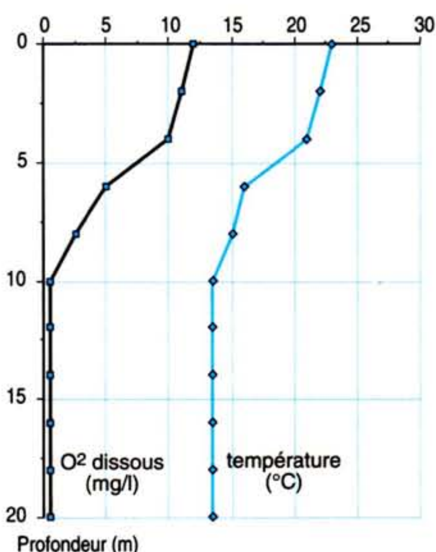
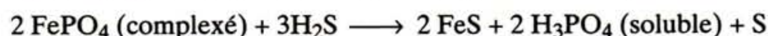


Figure II.3.5 — *Profils estivaux schématiques de température et d'oxygène dissous en plan d'eau stratifié. D'après Laverty, réf. 5*

3.1.3 L'accélération du relargage du phosphore des sédiments

Une part importante du phosphore est liée au fer à l'état de phosphate ferrique dans les sédiments. L'équation suivante présente le mécanisme affectant ce stock en cas d'abaissement excessif du potentiel d'oxydoréduction :



$$2\,FePO_4\ (\text{complexé}) + 3H_2S \longrightarrow 2\,FeS + 2\,H_3PO_4\ (\text{soluble}) + S$$

La réduction du fer conditionne largement le relargage du phosphore soluble. Le stock de phosphore dans les sédiments de plans d'eau âgés atteint couramment de 150 à 300 kg P/ha, dont une partie est mobilisable en cas d'anoxie de la colonne d'eau. On constate que la mobilisation d'une très faible fraction de ce stock suffit à enrichir la colonne d'eau au-delà du seuil critique pour l'eutrophisation de 50 mg/m^3 en P total.

Les données de la littérature (**Morin** [réf. 6]), et l'interprétation des données disponibles sur plusieurs plans d'eau français, mettent en évidence des flux de relargage de phosphore de l'ordre de 15 à 20 mg P/m^2/jour en cas

d'anoxie de la colonne d'eau. Ces flux de relargage permettent, dès lors qu'ils se prolongent, le démarrage des croissances algales.

3.1.4 Autres conséquences du développement de conditions réductrices dans la colonne d'eau

Dans les conditions d'oxydoréduction prévalant normalement dans une colonne d'eau, à plus de 5-6 mg/l en oxygène dissous, il n'est pas observé d'accumulation de composés réducteurs. On constate dans ce cas la minéralisation et l'oxydation des formes organiques de l'azote, la fixation du fer ferrique dans les sédiments à l'état de complexes insolubles ($FePO_4$, hydroxydes) et la fixation du manganèse dans les sédiments à l'état de MnO_2 insoluble.

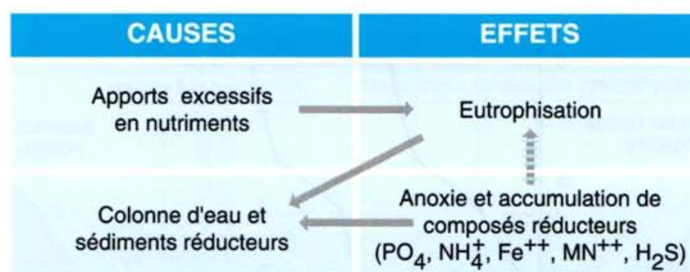


Figure II.3.6 — *Schéma des interactions bassin versant-plan d'eau. D'après Morin, réf. 6*

Lorsque le potentiel d'oxydoréduction dans la colonne d'eau s'abaisse en dessous de 0,5 V, on observe :

– le blocage de la nitrification, et par suite, l'accumulation de N-NH_4^+) ainsi que la dénitrification de NO_3^- ;

– le passage de Fe^{3+} insoluble à l'état Fe^{2+} soluble ;

– le passage de Mn^{4+} insoluble à l'état Mn^{2+} soluble.

Le risque de formation de H_2S apparaît quant à lui en cas d'abaissement du potentiel d'oxydoréduction à des valeurs négatives.

La figure II.3.6 schématise les interactions essentielles au sein du système bassin versant-plan d'eau. Le **rôle charnière de l'anoxie est mis en évidence et montre l'importance de la réoxygénation parmi les mesures correctrices.**

3.2 Nuisances sur la production d'eau potable

Si la conception académique de l'eutrophisation admet l'apparition du phénomène au-delà d'environ 10 mg/m^3 de chlorophylle a, le seuil de gêne pour le traitement de l'eau potable peut être situé en moyenne à 20 mg/m^3 pour ce composé. **Les principales nuisances induites par la désoxygénation et/ou l'eutrophisation pour la potabilisation sont** :

– **élévation des teneurs en matières organiques** particulaires et dissoutes – traduites par le COT et COD – et d'azote ammoniacal avec les effets suivants : élévation des consommations d'agents oxydants et floculants, formation d'haloformes

– **colmatage et feutrage des filtres,** induisant l'augmentation de la fréquence des lavages ;

– **remontées de boues dans les décanteurs** ;
– **perturbation de la floculation** et de la filtration par suite des variations de pH ;
– **nécessité** éventuelle de la mise en place **de traitements spécifiques** d'élimination du fer et du manganèse ;
– **risques de croissance de germes** dans les réseaux, induits à la fois par le résiduel en COD dans l'eau traitée et la consommation du résiduel bactériostatique ;
– **développements de goûts et d'odeurs** dans l'eau distribuée par suite notamment de la présence de métabolites algaux (géosmine, isobornéol) dont les seuils de détection gustative sont très bas, de l'ordre de 10 ng/l pour le premier composé.

3.3 Restauration de la qualité des eaux des lacs et retenues

Chaque plan d'eau constitue un écosystème particulier dont le fonctionnement dépend de paramètres plus ou moins contrôlés. Les objectifs de qualité sont également variables, en fonction des usages de l'eau. Enfin, l'urgence du problème dépend d'autres considérations parfois politiques. Chaque cas doit donc être résolu d'une façon spécifique. La connaissance du milieu est un préalable. Néanmoins, le gestionnaire doit adopter une attitude pragmatique, compte tenu de la complexité des phénomènes en jeu.

La mise en place de moyens curatifs permet d'améliorer rapidement l'état du plan d'eau (**Laverty** [réf. 5]). Dans le même temps, un programme à long terme de réduction des apports doit être entrepris. Enfin un suivi périodique de la qualité de l'eau permet de mesurer les effets obtenus et de mieux comprendre le fonctionnement de l'écosystème.

Des techniques curatives éprouvées et suivies scientifiquement, tout en représentant une charge économique (investissement, exploitation) compatible avec la valeur « sociale » du plan d'eau peuvent être mises en œuvre *(figure II.3.7)*.

Les traitements chimiques par épandages de microdoses de sulfate de cuivre sont utilisés sur de nombreux réservoirs d'AEP. Outre son efficacité variable, l'inhibition chimique ne sera pas abordée ici : elle constitue en effet une solution à court terme destinée à pallier à des situations transitoires, par suite de l'inévitable accumulation du cuivre dans les sédiments.

Les traitements évoqués sont les suivants :
– traitements d'aération ou d'oxygénation d'hypolimnion ;
– traitement d'aération diffuse ou destratification ;
– fixation du phosphore dans la partie amont des plans d'eau ;
– traitement d'oxydation de la matière organique des sédiments.

Ces techniques s'adressent alternativement aux apports amont, à la colonne d'eau et aux sédiments ; une combinaison de celles-ci est fréquemment nécessaire pour résoudre de manière satisfaisante le problème posé. Il n'existe de ce fait pas de solution unique ; chaque cas doit être traité distinctement à l'issue d'un diagnostic complet.

Protéger les lacs ne suffit plus, il convient de les gérer, au même titre que les autres composantes de notre environnement.

Leur gestion s'articule autour de trois principes :
– définition des objectifs,
– partage des responsabilités,
– mise en œuvre des moyens.

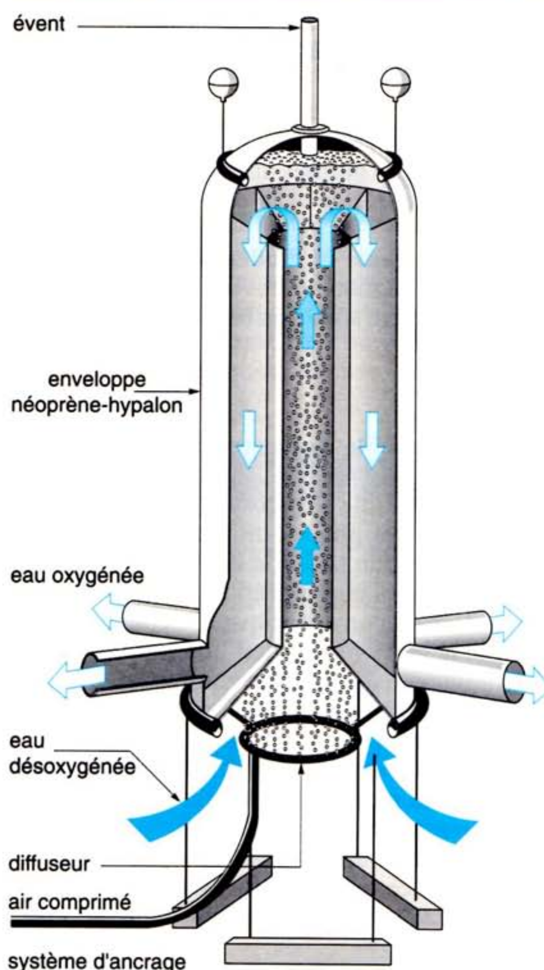


Figure II.3.7 — *Le Limno, d'après document Aqua Technique*

En fonction du but poursuivi et du diagnostic des problèmes, des moyens curatifs efficaces adaptés à chaque cas particulier sont disponibles. Ils doivent être mis en œuvre par des spécialistes en ingénierie de l'environnement, combinant expertise scientifique et expérience pratique éprouvées sur de nombreuses références (**Rosenbaum** [réf. 7]).

4 CAPTAGES ET FORAGES ET LEUR ENTRETIEN

En équilibre naturel, sur une longue période, l'écoulement total d'un bassin hydrologique est égal aux précipitations efficaces. Le débit de l'écoulement naturel superficiel et souterrain représente les sorties des bassins hydrologiques et hydrogéologique. Il est possible d'exploiter cet écoulement de quatre façons différentes :

- captage de l'eau superficiel dans la rivière (§ 1.1) ;
- captage dans le milieu souterrain, par forage ;

- captage de l'eau à l'interface milieu souterrain-terrain ;
- milieu superficiel par l'exploitation de sources.

4.1 Captage de source

Toute source que l'on envisage de capter doit être précédé d'une étude soignée de son alimentation et de sa vulnérabilité. On distingue classiquement, selon leur origine, quatre types de sources : émergence, déversement, débordement et artésienne *(figure II.3.8)*.

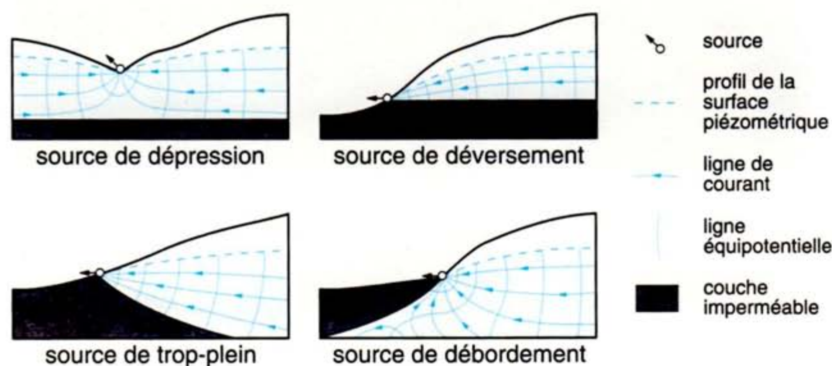


Figure II.3.8 — *Principaux types de sources de nappe libre, d'après Castany et Margat, réf. 8*

Il importe de **capter les sources dans leur propre gîte géologique, en dehors de toute contamination** possible par le milieu extérieur. Le captage est généralement constitué d'une chambre de captage encastrée dans l'aquifère, parfaitement étanche, pour la protéger des eaux de ruissellement, des eaux météoriques et des pollutions extérieures *(photo II.3.3)*. Si les sources sont nombreuses et de peu d'importance, on peut être amené à constituer des drains reliés par un canal étanché à l'ouvrage de tête du captage.

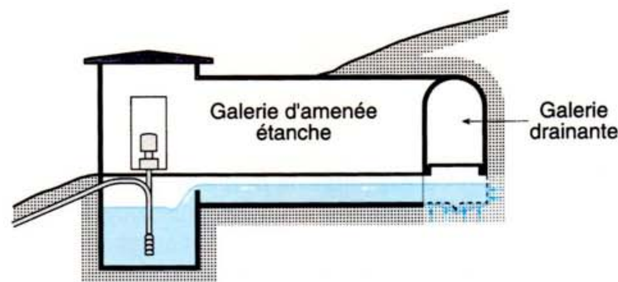


Figure II.3.9 — *Exemple de captage de source*

L'ouvrage de tête est une cuve entièrement étanche dans laquelle sont implantées les pompes de refoulement ou bien d'où part la conduite d'adduction gravitaire *(figure II.3.9)*.



Photo II.3.3 — *Arrivée des eaux de source (Vanne et Loing) à Montsouris*

Cet ouvrage doit comporter :

– une vanne d'isolement de l'amenée d'eau avec une vidange directe de l'amenée d'eau vers l'extérieur ;

– une vanne de vidange de fond ;

– une tubulure de trop plein dont le départ est toujours immergé de façon à former joint hydraulique.

La base de l'entretien consiste en une visite selon une fréquence variable fonction du débit prélevé et des conditions environnementales du site (risque de pollution). L'exploitant doit s'assurer qu'aucune dégradation susceptible de polluer la source n'est intervenue depuis la dernière visite (présence de rongeurs ou d'insectes, affaissement des ouvrages, ...). Il doit contrôler le débit total de la source si cela lui est possible, contrôler les volumes prélevés, s'assurer d'une bonne stérilisation si elle a lieu sur place *(photo II.3.4)*. Des prélèvements pour analyse doivent être effectués sur l'eau brute suivant une fréquence propre à chaque ressource.

4.2 Captage par forage

L'implantation d'un ou de plusieurs forages d'exploitation est une opération dont la responsabilité incombe à un hydrogéologue. L'exploitant est cependant souvent amené à s'y intéresser en tant que maître d'œuvre et en tant que participant financier au moins partiel.

L'exécution de forages d'exploitation doit être précédée :

– **d'une étude préalable** confiée à un hydrogéologue (étude documentaire, reconnaissances de terrain, éventuellement campagne géophysique) ;

– **de l'exécution d'un ou plusieurs forages de reconnaissance** ;

– **de l'exécution de pompages d'essai** sur ce ou ces forages de reconnaissance.

Dans tous les cas la mise en exploitation d'un champ captant doit être précédée d'une étude approfondie du bilan hydrologique et hydrogéologique. Dans le cas de nappe alluviale une attention particulière aux relations nappe-rivière sera donnée. L'étude des risque de potentiels de pollution de la nappe est également fondamentale. Une modélisation peut également être utile.



Photo II.3.4 — *Arrivée des eaux de source de la Vanne et du Loing au réservoir de Montsouris*

4.3 Techniques de forage

En fonction de la géologie (terrains sédimentaires plus ou moins cohérents, zones de socle dur, ...), ou de la profondeur à atteindre, plusieurs méthodes de forage peuvent être envisagées.



Photo II.3.5 — *Forage au Rotary*

Le diamètre de foration joue un rôle important. Le choix d'un diamètre de départ pour la foration devra être fait en fonction de la profondeur de l'ouvrage et des dimensions définitives de celui-ci. En effet, la nature de l'équipement d'exhaure (nombre et dimension des pompes notamment) varie en fonction du débit escompté, de la hauteur manométrique totale, et reste tributaire du diamètre du forage équipé.

On distingue plusieurs méthodes de foration, applicables aussi bien pour la réalisation de sondages de reconnaissance que de forages d'exploitation :

– forage par battage, où le trépan, lourde pièce d'acier, tombe en chute libre sur la roche à s'agréger. Il est remonté par le câble d'un treuil. En terrain meuble le tube de soutènement est descendu au fur et à mesure de l'avancement. Les débris sont récupérés à l'aide d'une soupape, cylindre creux terminé par un clapet ;

– forage au Rotary, appareil à rotation comprenant un outil suspendu à l'extrémité d'un train de tiges creuses à l'intérieur desquelles circule un fluide *(photo II.3.5)*. L'outil est un tricône banalisé par les forages pétroliers. La rotation est rapide ;

– forage à la tarière ;

– forage au marteau fond de trou : un outil perforateur situé au bout du train de tiges. Le mouvement de rotation est transmis par le train de tige. Le mouvement de battage est engendré par le marteau. Les débris sont remontés par l'air.

4.4 Equipement des forages

Quel que soit le procédé de forage utilisé, l'équipement comporte toujours une colonne d'exploitation maintenant le terrain dans la partie supérieure non aquifère et une partie crépinée dans la nappe aquifère.

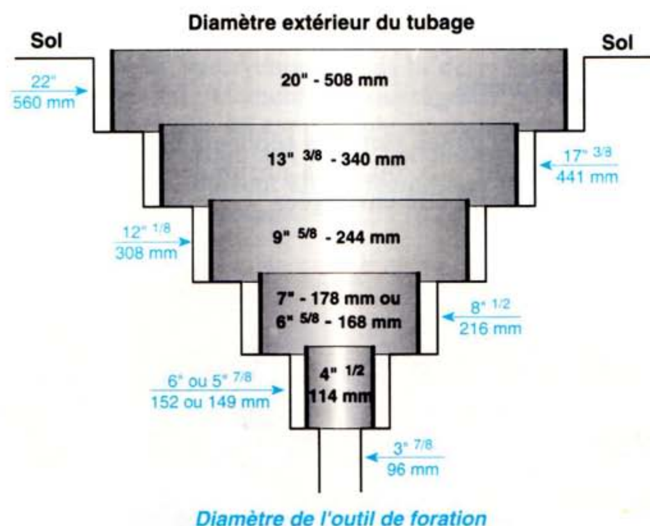


Figure II.3.10 — *Relations entre les diamètres des outils rotary et les diamètres des tubages les plus courants. D'après M. Detay, réf. 9*

L'espace annulaire compris entre la colonne d'exploitation et le terrain est en général cimenté dans sa partie supérieure. La partie comprise entre le trou nu du forage et la crépine est remplie de gravillons siliceux soigneusement calibrés *(photo II.3.6)*.

Les tubes d'exploitation sont en général en acier ordinaire.

La mise en place du massif filtrant est une opération délicate. Pour être efficace et permettre les opérations de nettoyage et de développement dans de bonnes conditions, le massif filtrant doit avoir une épaisseur minimale de 3" (75 mm). Il est généralement admis qu'il ne doit pas dépasser 8" (2 300 mm). Le massif filtrant doit avoir son niveau supérieur nettement au-dessus du toit de la couche aquifère ou du sommet de la crépine *(figure II.3.10)*.

Les crépines sont en acier inox, semi-inox ou en plastique *(photo II.3.7)*. La forme des ouvertures est très variable (trous circulaires, fentes, nervures repoussées, ...). Leur principale caractéristique est le pourcentage de vide (5 à 50 %). La vitesse de l'eau à travers la crépine ne doit pas dépasser 30 mm/s.

La tête de puits doit être réalisée avec soin car elle conditionne l'étanchéité du captage. C'est un élément important pour éviter les pollutions accidentelles par les eaux superficielles. Classiquement la tête de puits doit être cimentée sur au moins trois mètres. Enfin, la tête de puits est généralement incluse dans un petit ouvrage de génie civil. Ce dernier doit être conçu dans un souci d'optimisation de l'exploitation, on veillera notamment à ce qu'il soit équipé d'un dispositif anti-intrusion et correctement appareillé de manière à pouvoir facilement enlever la pompe et la colonne de captage. Enfin, elle doit être parfaitement ventilée de manière à éviter la condensation qui pourrait être source de pollution.

4.5 Développement des forages

On procède au développement d'un forage lorsque celui-ci est totalement équipé (tubage, crépine et massif filtrant). Cette opération consiste à améliorer la perméabilité naturelle de la formation aquifère autour de la crépine. Le développement a également pour but de stabiliser l'aquifère dans la zone de captage, d'éliminer le cake ou fluide de forage qui protège la paroi et d'augmenter la capacité spécifique du forage.

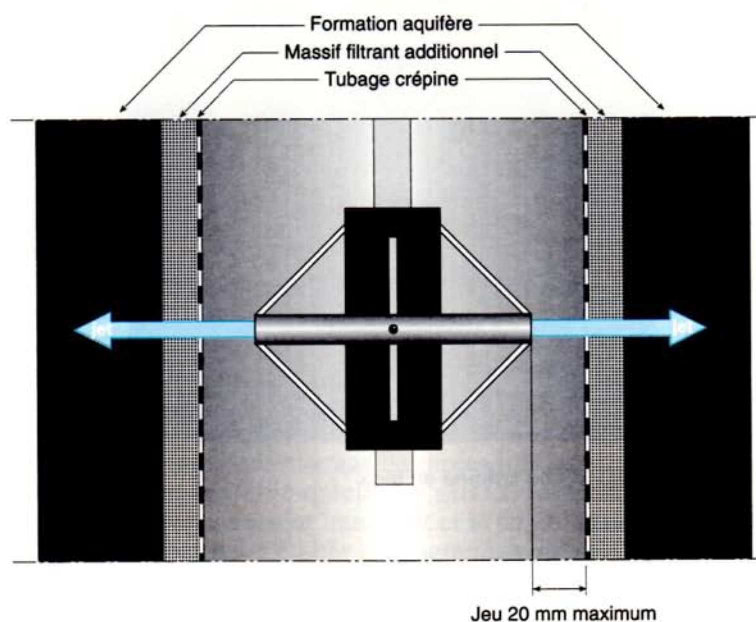


Figure II.3.11 — *Schéma du développement au jet sous pression, d'après Detay M., réf. 9*



Photo II.3.6 — *Remplissage de gravillons calibrés entre forage et crépine béton*



Photo II.3.7 — *Descente d'une crépine en inox*

Bien sûr, même en l'absence de développement, la mise en exploitation d'un ouvrage permet un certain auto-développement mais cette opération est lente, destructrice pour le matériel de pompage et sans effet sur les ponts de sables qui risquent de venir ensabler le forage.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour le pompage de développement :

– **Le surpompage**, c'est la méthode la plus simple, elle consiste en un pompage à un débit très supérieur au débit d'exploitation estimé.

– **Le pompage alterné** : alternance de démarrages et d'arrêts brusques de la pompe afin de créer de brèves et puissantes variations de pression sur la couche aquifère, inversant le flux à travers la crépine grâce à une pompe sans clapet qui à chaque arrêt laisse refluer l'eau de la colonne dans le forage.

– **Le pistonnage** : un mouvement alternatif de bas en haut provoque des mouvements locaux de l'eau qui extraient les fines (parties les plus fines du terrain).

– **Pompage entre packers**. Un packer est un disque obturant le forage avec un joint au contact de la crépine. On pompe à l'aide d'une pompe immergée entre 2 packers ce qui développe le tronçon situé entre les 2 packers. On développe le forage entier ou seulement certaines parties par passes successives en déplaçant les packers.

– **Développement à l'émulseur** : c'est la méthode la plus employée. Elle fait intervenir une alternance de phases de pompage par émulseur et de phases d'envoi d'air sous pression (chasses d'eau) à partir d'un dispositif « double colonne », une colonne d'envoi d'air dans une colonne de production d'eau émulsionnée. Cette méthode simple nécessite quand même de dimensionner correctement son dispositif d'air lift.

– **Lavage de la crépine par jet d'eau sous pression** *(figure II.3.11)*. De l'eau à forte pression (50 bars) est injectée très près de la crépine par des jets diamétralement opposés animés d'un mouvement de rotation rapide et de remontée lente.

Toutes ces méthode de développement peuvent être combinées à des traitements chimiques de manière à cumuler hydraulique et traitement.

4.6 Pompage d'essai

Les pompages d'essai doivent être réalisés après le nettoyage et/ou le développement d'un ouvrage. Ils permettent de déterminer :

– **les caractéristiques du complexe aquifère/ouvrage,** avec la **courbe caractéristique,** s = f (Q), véritable fiche d'identité de l'ouvrage, établie d'après **les pompages d'essai par paliers** *(figure II.3.12)* ;

– **les paramètres hydrodynamiques,** S et T, calculés d'après **les pompages d'essai de longue durée** ;

– **les conditions d'exploitation** de l'ouvrage ;

– l'évolution des rabattements en fonction du débit et du temps pour une exploitation de longue durée (calculs d'interférences).

4.6.1 Pompages d'essai en régime permanent

Le pompage d'essai par paliers de courtes durées évalue les caractéristiques du complexe aquifère/ouvrage de captage. Ce sont : les débits critiques, le débit spécifique, le débit spécifique relatif, les pertes de charge dans l'ouvrage et son environnement immédiat et le débit maximum d'exploitation ou productivité. Il permet d'établir le programme d'équipement technique de l'ouvrage : tubage, crépine et massif filtrant, puissance de la pompe, etc.

Le but principal des pompages d'essai par paliers est de déterminer **la courbe caractéristique du puits,** s = f (Q), soit l'évolution du rabattement en fonction du débit de pompage, et le **débit critique** Q_c.

Un pompage d'essai par paliers se réalise généralement en quatre, parfois trois paliers de pompage. La courbe caractéristique est obtenue en représentant sur un graphique la relation débit-rabattement.

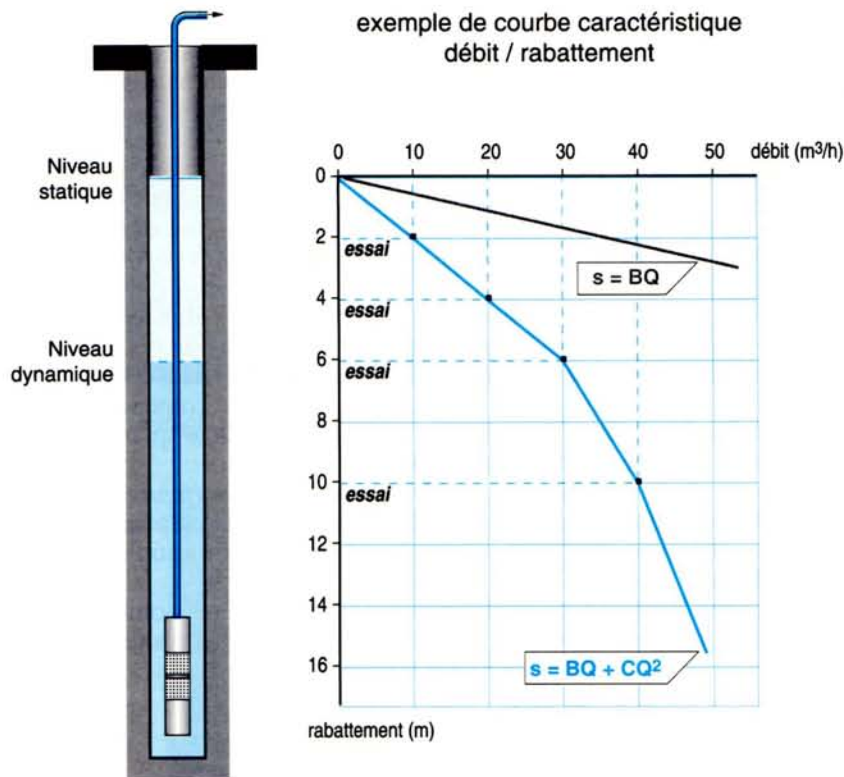


Figure II.3.12 — *Exemple de courbes caractéristiques, d'après Detay M., réf. 9*

Sur le plan de la méthodologie de mise en œuvre plusieurs pratiques s'affrontent :

– **Réalisation de l'essai en régime : permanent.**

C'est l'idéal, il s'agit de pomper à des débits Q_1, Q_2, Q_3, etc., pendant un temps qui peut être plus ou moins long mais jusqu'à obtention d'une stabilisation (régime permanent). On peut ainsi associer à un débit Q_1 un rabattement s_1 correspondant.

– **Réalisation de l'essai en régime : quasi-permanent.**

C'est le plus répandu mais plus on se rapproche du « quasi » plus on observe des pseudo-stabilisations et moins l'essai a de sens. Ces essais ne permettent pas de calculer les valeurs absolues des paramètres hydrodynamiques avec une validité acceptable.

Le niveau statique initial sera mesuré avant la mise en marche de la pompe, dès l'arrivée sur le chantier. Avant le début de l'essai, la veille si possible, la pompe est mise en marche une dizaine de minutes, vanne d'exhaure ouverte à fond afin de mesurer le débit maximal de production de l'ouvrage, soit Q_{max}.

Le débit de chaque palier sera ensuite défini comme suit :

Essai avec 4 paliers	Essai avec 3 paliers
Palier 1 $Q_1 = \frac{Q_{max}}{4}$	Palier 1 $Q_1 = \frac{Q_{max}}{3}$
Palier 2 $Q_2 = \frac{Q_{max}}{2}$	Palier 2 $Q_2 = \frac{2\,Q_{max}}{3}$
Palier 3 $Q_3 = \frac{3\,Q_{max}}{4}$	Palier 3 $Q_3 = Q_{max}$
Palier 4 $Q_4 = Q_{max}$	

Pour chaque palier le niveau dynamique, ND, et le débit à intervalles réguliers seront mesurés comme indiqué dans le tableau II.3.3.

Tableau II.3.3 — *Cadences des mesures au cours d'un pompage d'essai*

Durée depuis le début de la descente ou de la remontée	Mesures des niveaux ou des rabattements	Mesures de débit
0 à 5 mn	toutes les 30 secondes	toutes les minutes
5 à 10 mn	toutes les minutes	toutes les 2 minutes
10 à 20 mn	toutes les 2 minutes	toutes les 5 minutes
20 à 40 mn	toutes les 5 minutes	toutes les 5 minutes
40 mn à 1 h 30	toutes les 10 minutes	toutes les 10 minutes
1 h 30 à 3 h	toutes les 15 minutes	toutes les 15 minutes
3 h à 5 h	toutes les 30 minutes	toutes les 30 minutes
5 h à 8 h	toutes les heures	toutes les heures
au-delà de 8 h	toutes les heures	toutes les heures

Il convient également de mesurer la hauteur du repère éventuel par rapport au sol.

Pour tout pompage d'essai par paliers, il est préférable d'arrêter la production de l'ouvrage à tester au moins la veille de l'essai (minimum 10 heures avant).

4.6.2 Pompages d'essai en régime transitoire

Le but principal des pompages d'essai en régime transitoire est de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, transmissivité T et coefficient d'emmagasinement S, et le débit d'exploitation optimal de l'ouvrage, compte tenu de ses caractéristiques, de celles de l'aquifère et de la présence éventuelle d'autres ouvrages exploités à proximité (calculs d'interférences).

Les pompages d'essai en régime transitoire sont de longue durée par rapport aux essais en régime permanent. Ils sont exécutés en un seul palier de débit (débit constant) pendant au moins 48 heures, avec un optimum à

72 heures. La remontée doit être mesurée pendant au moins 6 heures et normalement pendant une durée égale à celle de l'essai. Le débit de l'essai est choisi d'après la courbe caractéristique déterminée par les essais en régime permanent.

L'interprétation des données (descente et remontée) reposent sur l'emploi des expressions hydrodynamiques en régime transitoire établies par **Theis**. La formule de Theis se présente sous deux formes : soit formule exponentielle intégrale, soit approximation logarithmique de celle-ci. C'est cette dernière, d'un maniement plus aisé, qui est la plus souvent utilisée.

Le pompage d'essai de longue durée poursuit trois buts principaux :

– **mesure des paramètres hydrodynamiques** : transmissivité et coefficient d'emmagasinement ;

– **étude quantitative des caractéristiques de l'aquifère** : conditions aux limites (confirmation de la distance du puits à la limite, colmatage des berges d'une rivière), structure (hétérogénéité, drainance) ;

– **évaluation de la ressource en eau souterraine exploitable** par observation directe, en « vraie grandeur », de l'effet de l'exploitation sur l'aquifère. Prévision de l'évolution du rabattement en fonction des débits pompés.

La résolution des expressions d'approximation logarithmique proposée par **Jacob**, est obtenue par le tracé et l'interprétation de la droite représentative rabattements/logarithmes des temps de pompage ou rabattements résiduels/logarithmes des temps de remontée.

L'interprétation des pompages d'essai fait appel à de nombreuses méthodes. Cependant, aussi séduisant que soit l'appareil mathématique, il ne saurait conduire à des résultats sérieux si le problème n'est pas bien posé. Aussi est-il fondamental, avant de vouloir interpréter des essais de débit, de bien analyser la situation hydrogéologique. En aucun cas le raffinement de l'interprétation ne saurait compenser les défauts du programme d'acquisition des données. Il faut également bien prendre conscience que les valeurs trouvées sont des ordres de grandeur.

4.7 Contrôle et réception des travaux

L'exécution d'un captage d'eau est une opération délicate et complexe et il est essentiel, pour obtenir un ouvrage présentant les meilleures garanties possibles, d'en assurer ou d'en faire assurer le contrôle en continu.

Ce contrôle doit être effectué par un spécialiste du forage, dénommé selon les cas, superviseur, ingénieur de forage, contrôleur, hydrogéologue, ... Ce dernier est un technicien expérimenté qui connaît toutes les subtilités du métier et qui saura prendre les décisions qui s'imposent pour faire respecter les règles de l'art.

Il faut bien prendre conscience que la réalisation d'un forage présente des risques techniques dont les conséquences financières sont très importantes. La mission du superviseur est donc fondamentale, pendant toute la durée d'exécution du forage. Il vérifiera la bonne exécution du programme technique et sera l'observateur objectif qui fournira au maître d'ouvrage des éléments fiables sur le déroulement du chantier.

Sa mission comporte notamment de :

- s'assurer des moyens techniques de l'entreprise de forage,
- vérifier la conformité du matériel utilisé,
- contrôler la mise en place des tubages et du massif de gravier,
- vérifier les paramètres de forage en cours d'opération,

– diriger les opérations de développement,
– superviser l'exécution des pompages d'essais,
– s'assurer que toutes les opérations de contrôle ont été effectuées en vue de la réception.

Il veillera notamment à la propreté du chantier et à la désinfection du matériel, de nombreux problèmes de pollution bactériologique apparaissant à la suite de travaux réalisés dans de mauvaises conditions d'hygiène. L'introduction de germes lors des travaux conduit parfois à des ensemencements bactériens favorisés par les conditions de température de l'eau de l'aquifère et la nature du milieu. Ces problèmes, quand ils ont lieu, sont difficiles à résorber alors qu'il est simple de respecter des conditions d'hygiène lors des travaux.

Le superviseur est responsable du rapport de fin de travaux, où toutes les opérations doivent être indiquées selon la chronologie des événements.

Enfin, il est difficile, sauf dans des cas très particuliers, de connaître à l'avance la coupe géologique de façon précise et l'équipement qu'aura le forage. Ainsi, le maître d'ouvrage a une enveloppe estimative du coût du chantier, fondée sur les bases d'un calcul théorique et fonction du bordereau de prix unitaire de l'entreprise. La réalité de chantier est toujours différente et il doit faire face à des dépenses imprévues : immobilisation du chantier, temps d'instrumentation, temps de développement, d'essai de puits, nombre d'acidification, longueur du tubage, etc.

Il est fondamental, dans l'intérêt des exploitants et dans le cadre d'une gestion saine, que les travaux de forage soient réalisés dans la clarté et qu'ils débouchent sur des rapports fiables. L'hydrogéologue aura pour mission, en plus du contrôle du chantier, de réaliser le rapport de forage qui servira de base à l'hydrogéologue agréé pour la prise de DUP. La présence d'un hydrogéologue superviseur sur un chantier de forage est indispensable.

4.8 Maintenance des forages

Pour exploiter correctement un captage d'eau souterraine, on doit impérativement considérer que le captage et le pompage sont indissociablement liés. On ne saurait en aucun cas gérer l'un sans l'autre. Trois conditions sont essentielles pour assurer la gestion de cet ensemble particulier que constituent le captage et son pompage.

4.8.1 Adapter la pompe au captage

Il est fondamental que l'ouvrage soit équipé en fonction de ses caractéristiques propres, identifiées au vue des résultats des pompages d'essai, et non en fonction des besoins à couvrir. La surexploitation d'un captage entraînera immanquablement des phénomènes graves d'ensablement, de corrosion, de colmatage, etc. Il convient soit de réaliser d'autres ouvrages d'appoint dont on ne pourra fixer les consignes d'exploitation qu'après avoir réalisé des essais, soit d'augmenter les capacités de stockage par la création de réservoirs.

La pompe est un élément essentiel du captage. Elle doit être dimensionnée en fonction de nombreux critères :

– caractéristiques du réseau d'exhaure (forage directement connecté au réseau après une simple chloration, au forage alimentant en eau brute une installation de traitement) ;
– équipement de l'ouvrage, position des crépines, localisation de la chambre de pompage, diamètre des équipements, etc. ;

– caractéristiques hydrogéologiques locales, position du niveau piézométrique, du niveau dynamique, du régime de pompage prévisible ;
– NPSH de la pompe, en particulier pour les ouvrages dont le niveau dynamique est très bas (aquifère peu épais, risque de vortex) ;
– risques d'interférence avec d'autres forages au sein d'un champ captant ;
– position géographique du captage par rapport aux unités de traitement, l'installation de limiteurs de débit permet notamment de minimiser les oscillations du niveau de la nappe en exploitation.

4.8.2 La connaissance des paramètres patrimoniaux

La connaissance des données patrimoniales est un élément essentiel pour une bonne gestion. Les paramètres d'exploitation de l'ouvrage doivent absolument être mis à la disposition des exploitants. Dans cet esprit Lyonnaise des Eaux utilise une base de données qui permet de disposer de l'ensemble des paramètres patrimoniaux. Des sorties sur papier permettent de disposer de toutes les variables de l'ensemble des forages au sein de chaque champ captant. Ces données regroupent notamment :
– la coupe technique de l'ouvrage,
– les principales caractéristiques physico-chimiques de l'eau,
– la position du niveau statique et du niveau dynamique à différents débits (courbe caractéristique),
– le débit spécifique de l'ouvrage,
– la position de la pompe et ses caractéristiques,
– le débit d'exploitation maximum à ne pas dépasser, etc.

Un exploitant ne peut pas gérer correctement ses captages sans avoir connaissance de ces informations patrimoniales. A défaut de cette information de base, aucune surveillance n'est possible et par suite, aucun entretien préventif.

4.8.3 Les équipements techniques

Pour juger du bon fonctionnement d'un captage d'eau souterraine et déceler une anomalie, il est nécessaire que l'installation soit pourvue d'un minimum d'équipements techniques, au demeurant peu onéreux. Conformément aux recommandations des agences de l'eau, **ces appareillages sont, pour les équipements de pompage** :
– Un compteur d'eau.
– Un compteur horaire par pompe.
– Un ampèremètre par pompe.
– Un voltmètre.
– Un manomètre.
– Un dispositif de protection des pompes contre le désamorçage.
– Une prise d'échantillon pour analyses.

La pratique montre également qu'il est nécessaire que le captage soit équipé, au refoulement de la pompe, d'un piquage permettant d'évacuer l'eau pompée sans passer dans le réseau. Ce dispositif permet notamment de faire des essais de pompage divers, de stériliser le puits et d'évacuer l'eau, etc.

Pour le captage lui-même :
– Un tube piézométrique permettant, à condition de disposer d'une sonde de niveau, de vérifier les différents niveaux de la nappe (statique et dynamique).

– Eventuellement, un capteur de pression qui transmettra les mêmes ndications que ci-dessus, mais sous une forme permettant une exploitation nformatisée.

Il convient également que le captage soit nivelé (en NGF) de manière à pouvoir disposer des cotes piézométriques dans un ensemble cohérent de données.

4.9 Vieillissement et traitement des forages

Malgré toutes les protections et tous les contrôles réguliers dont peut bénéficier un ouvrage de captage, il est impossible de le maintenir éternellement en bon état. Le vieillissement est donc un phénomène inéluctable qui s'accompagne de plusieurs effets :

Phénomènes de corrosion :
- corrosion électrochimique,
- corrosion bactérienne.

Phénomènes de colmatage :
- colmatage mécanique,
- colmatage chimique,
- colmatage biologique.

4.9.1 La corrosion

La corrosion des captages d'eau souterraine est un phénomène beaucoup plus sournois que le colmatage car ses effets sont souvent moins détectables. En revanche, ses conséquences en sont au moins aussi spectaculaires et importantes pour la pérennité de l'ouvrage en cause.

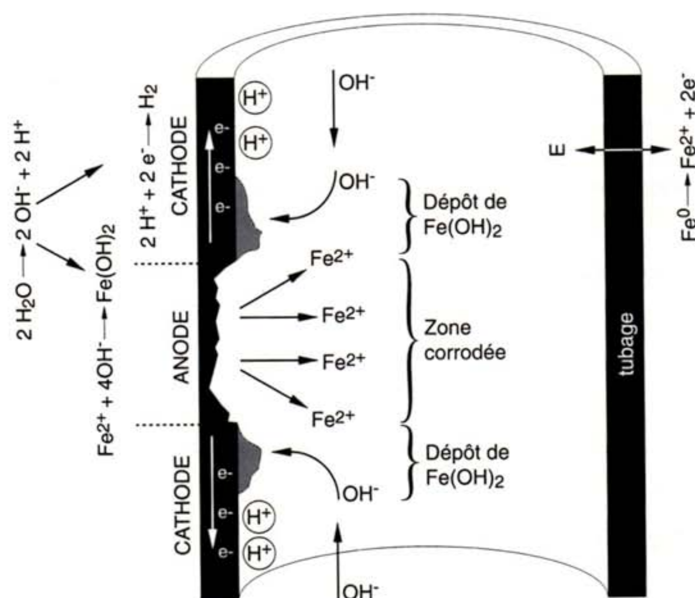


Figure II.3.13 — *Processus de la corrosion électrolytique en milieu désaéré, d'après Detay, réf. 9*

La corrosion est un phénomène complexe attribuable généralement à plusieurs causes simultanées :

– présence d'eau corrosive à l'intérieur ou à l'extérieur d'un forage,

– effets galvaniques entre les diverses parties du même ensemble métallique au contact d'eaux de compositions différentes, ou entre métaux différents non isolés les uns des autres, mais au contact de la même eau,

– activité de bactéries sidérophiles ou sulfatoréductrices.

Ces phénomènes de corrosion *(figure II.3.13)* peuvent se traduire par :

– une simple dissolution du métal sur une large surface (corrosion uniforme),

– une attaque du métal localisée à de très petites surfaces, et parfois en profondeur, jusqu'à perforation (corrosion par piqûres),

– une attaque du métal en « cuvettes » apparaissant surtout sur les crépines en tôle roulée ou en tubes étirés, perforés ou non (corrosion intergranulaire),

– des fissures linéaires plus ou moins ramifiées (corrosion fissurante).

4.9.2 Le colmatage

Le colmatage des forages se traduit par une baisse progressive du rendement de l'ouvrage. C'est généralement le premier symptôme caractéristique du vieillissement. Les origines de ce colmatage peut être très diverses, mais le résultat est toujours le même : baisse de la perméabilité du milieu environnant immédiat (massif de graviers filtrant ou formation elle-même), ou bien accroissement des pertes de charges dû à la diminution du pourcentage de vide de la crépine (concrétions ou incrustations).

Le colmatage des forages d'exploitation, mais également le colmatage du lit et des berges d'un fleuve, dans le cas d'aquifères alluviaux, peut avoir de graves conséquences économiques dans la mesure où il entraîne nécessairement une baisse de production et donc une augmentation du prix de l'eau. Il en est de même dans le cas de colmatage des dispositifs de réalimentation artificielle. Il importe donc de déterminer les causes de colmatage et de mettre en place des dispositifs de traitement appropriés.

Sur le terrain on peut observer sur un même ouvrage plusieurs types de colmatage : mécanique (ensablement ou colmatage du massif filtrant), chimique (carbonates ou dépôts ferrugineux), ou biologique.

Colmatage mécanique : des particules fines (sable, argiles, colloïde) peuvent être entraînées sous l'effet du pompage et venir boucher l'ouvrage ou colmater le massif filtrant.

Colmatage chimique : les deux phénomènes susceptibles de déclencher un colmatage chimique sont le dégagement de CO_2 et l'apport d'O_2. Le premier entraîne la précipitation de carbonates à partir de bicarbonates, et le déplacement de l'équilibre entre fer bivalent et trivalent, qui conduit à la précipitation d'hydroxydes ferriques. Le second entraîne la formation d'oxydes ferriques insolubles à partir d'ions ferreux dissous dans l'eau ou à partir du fer métallique de l'ouvrage. On observe principalement des phénomènes de colmatage dûs aux précipités de carbonates et aux dépôts de fer-manganèse.

Colmatage biologique : Le colmatage biologique se caractérise généralement par la présence d'éléments filamenteux dans l'eau pompée, de flocons ou de blocs gélatineux, parfois bien avant que ne se manifeste la perte de productivité de l'ouvrage. Le plus souvent ces phénomènes sont liés aux bactéries du fer et du manganèse.

Les conditions favorables au développement des bactéries sont les suivantes :

- un pH compris entre 5,4 et 7,2,
- une teneur en fer ferreux comprise entre 1,6 et 12 mg/l,
- la présence de CO_2,
- le potentiel d'oxydoréduction Eh doit être supérieur à – 10 mV ± 20 mV.

4.9.3 Traitement du colmatage mécanique

L'ensablement d'un captage d'eau souterraine trouve le plus souvent son origine dans la corrosion, la surexploitation ou une mauvaise conception de l'ouvrage. Malheureusement il n'y a pas vraiment de remède rationnel contre l'ensablement d'un ouvrage définitivement équipé.

Devant un ouvrage ensablé, le premier problème auquel on se trouve confronté est de savoir précisément d'où vient le sable. On peut cependant distinguer l'ensablement accidentel de l'ensablement permanent.

– Dans le premier cas, l'ensablement est produit sous l'effet de la rupture de la crépine (dans ce cas, on peut retrouver des éléments du massif filtrant dans le forage) ou éventuellement d'un désordre hydraulique important dû à un surpompage.

– Dans le second cas, l'ensablement est progressif et peut devenir un réel problème pour l'ouvrage au terme de plusieurs années. Cette situation est plus caractéristique d'une mauvaise conception (mauvais choix de l'équipement et du massif filtrant, mauvais développement du forage) ou d'une surexploitation.

Quoi qu'il en soit, il sera nécessaire, dans un premier temps, d'enlever le dépôt de sable qui encombre le forage (parfois sur des hauteurs de plusieurs mètres). Cette opération peut se faire de diverses façons en fonction de la profondeur ou du diamètre du captage par air-lift, curage, pompage, pistonnage, traitement chimique (polyphosphates, produits spéciaux), etc.

Ce traitement aux polyphosphates permet de défloculer les argiles de l'aquifère. On utilise ordinairement de l'hexamétaphosphate qui présente l'avantage d'être bon marché et l'inconvénient d'être difficilement soluble dans l'eau. On en utilise environ 50 kg par m^3 d'eau de forage. La solution est préparée en surface avant injection. L'eau de forage doit être agitée soit par pompage alterné, soit par pistonnage, soit par pompage et réinjection en tête de forage et ceci pendant 24 heures. Au bout de ce temps on repompe le polyphosphate et on pratique un nouvel essai de pompage pour constater l'efficacité du traitement.

4.9.4 Traitement du colmatage chimique

On rencontre deux grands types de colmatages chimiques constitués soit de dépôts carbonatés soit de dépôts de fer-manganèse. Nous ne nous intéresserons qu'au premier, aucun traitement n'est possible pour le second pour l'instant.

Sous le terme de carbonates, on désigne les mélanges de carbonates, de bicarbonates, de sulfates alcalino-terreux, d'hydrates et d'hydroxydes. Sous l'action de différents facteurs physiques (vitesse, aération, variations de pression, etc.), l'eau de la nappe est amenée parfois à déposer sur la partie captante de l'ouvrage (crépine, drains, massif de graviers) des concrétions calcaires ou ferrugineuses ou, quelquefois, les deux en même temps.

Cet entartrage ne se produit pas forcément de manière régulière. Il peut toucher certaines parties du système captant et laisser subsister des passages suffisants pour maintenir un certain débit. La réduction de productivité de l'ouvrage reste néanmoins l'indice caractéristique du colmatage de l'ouvrage.

Le phénomène d'entartrage physico-chimique peut être influencé par les conditions d'exploitation, par exemple lorsque l'ouvrage est soumis à de fréquents démarrages et arrêts du pompage.

Le colmatage physico-chimique peut être également une conséquence de la corrosion. L'attaque des métaux constitutifs de certaines crépines peut former des concrétions qui obstruent les orifices provoquant des colmatages localisés ou généralisés de dépôts ou incrustations, visibles en auscultation vidéo.

Le vieillissement des forages induit une baisse progressive du rendement essentiellement due à un colmatage des parties crépinées. L'origine et la composition de ces dépôts s'avèrent très variables. Très souvent l'analyse des causes n'est pas faite et l'exploitant se contente de réduire le débit de la pompe par vannage jusqu'à abandon de l'ouvrage. Cette opération entraîne une baisse de rendement de la pompe et un coût d'exploitation plus élevé alors qu'il existe des techniques qui permettent de ralentir le colmatage ou même de régénérer les ouvrages. **La réhabilitation nécessite cependant la parfaite connaissance des caractéristiques du forage ainsi que la mise en œuvre d'études complémentaires du point de vue hydrogéologique et chimique** :

– identification des caractéristiques hydrogéologiques et notamment de leurs variations dans le temps, par la comparaison de courbes caractéristiques, par exemple ;

– définition des variations de la qualité chimique de l'eau par une campagne d'analyses physico-chimiques ;

– analyse des dépôts colmatants et de leur extension, il n'est pas systématique que toute la hauteur crépinée soit touchée ;

– reconnaissance de l'équipement du forage, certains produits de traitement étant contre-indiqués en présence de métaux comme l'acier galvanisé, le zinc, etc. ;

– choix du traitement le mieux adapté et définition d'une stratégie de réhabilitation comprenant une succession de traitements physiques (action mécanique et hydraulique) et chimiques (dissolution des calcaires et stérilisation).

Les produits les plus couramment utilisés pour le traitement du colmatage par les carbonates sont l'acide chlorhydrique (ou muriatique) et l'acide sulfamique pour les acides. Le produit commercial le plus courant est à 33 % (HCl à 22°B^{é}) et il est ramené à environ 10 % lors de l'opération de décolmatage. Compte tenu du pH acide et de la teneur en chlorures du milieu, les métaux acier, inox, bronze sont attaqués. On utilise également des polyphosphates dans certains cas particuliers (présence de dépôts d'argile ou de limon). Les acides sont bien entendu passivés par des inhibiteurs pour rendre leur action compatible avec les constituants métalliques de l'ouvrage.

4.9.5 Traitement du colmatage biologique

Les signes du colmatage lié à une activité bactérienne sont maintenant bien connus. Ils se manifestent par la présence de masses ou d'agglomérations gélatineuses ou visqueuses qui adhèrent indifféremment sur toute partie du captage et de la pompe. Les crépines s'obstruent progressivement, allant parfois jusqu'à entraîner une réduction du débit d'exhaure supérieure à 50 % de

la productivité habituelle de l'ouvrage. Ce type de colmatage semble être lié à un apport de flux nourricier à la faveur du pompage favorisant la formation d'une biomasse colmatante.

Pour lutter contre le colmatage biologique, il convient généralement d'injecter, sous pression ou par gravité, des produits stérilisants, type chlore ; sous forme d'hypochlorite de calcium, d'hypochlorite de sodium (eau de Javel), de permanganate de potasse, de peroxyde d'hydrogène ; etc.

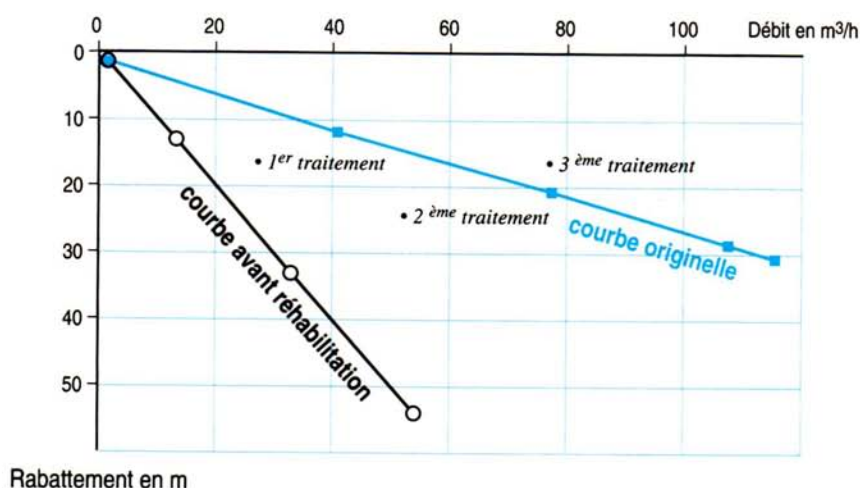


Figure II.3.14 — *Réhabilitation du forage 5S du champ captant de Villeneuve-la-Garenne. Traitement à l'hypochlorite de sodium. D'après Detay M., réf. 9*

Le colmatage peut se produire :
- au droit de la crépine,
- au sein du massif filtrant,
- au sein de la formation aquifère.

Dans les deux premiers cas, des traitements de stérilisation à intervalles réguliers ou en continu (hypochlorite de calcium, hypochlorite de sodium *(figure II.3.14)*, permanganate de potassium, etc.) peuvent donner de bons résultats. En cas de traitement continu, celui-ci doit se faire à une teneur de 1 g/l de chlore actif au droit de la zone à traiter.

Dans le troisième cas (et parfois le second aussi), le traitement de choc à l'aide d'hypochlorite de sodium paraît prometteur. Il reste encore à vérifier l'absence de réactions secondaires indésirables et à préciser la durée d'efficacité de ce type de traitement.

4.10 Equipement d'exhaure des forages

Une fois les caractéristiques hydrodynamiques du forage identifiées, il convient d'installer le matériel d'exhaure propre à refouler l'eau vers l'usine, le réservoir ou le réseau voisin. Cet équipement d'exhaure comprend classiquement :

- **Un groupe électropompe** dont au moins la pompe est immergée.
- **Une colonne montante** permettant au tuyau soutenant la pompe d'atteindre le niveau du sol, à l'intérieur du forage.

– **Un compteur d'exhaure** à l'extérieur du forage.

– **Eventuellement un réservoir antibélier à l'extérieur** du forage.

– **Une décharge** permettant d'effectuer des pompages d'essais du forage et rejetant son eau à l'égout, dans un fossé ou un ruisseau ou en tout cas assez loin du forage.

– **Une vanne d'isolement.**

– Le plus souvent le **clapet de la pompe** dont la fiabilité n'est pas absolue **est doublé d'un clapet en tête de colonne montante**.

L'ordre de ces divers organes n'est pas indifférent.

Le compteur doit être placé avant l'antibélier de façon à ne pas être affecté par les faibles débits engendrés ou absorbés par cet appareil lors des coups de bélier. Il doit de même être placé avant la décharge de façon à pouvoir être utilisé lors des essais de débits.

L'antibélier peut être branché avant la vanne d'isolement si le forage démarre et s'arrête vanne ouverte. Par contre, il arrive souvent que pour ménager le forage ou pour limiter l'appel de courant au démarrage de la pompe, on démarre la pompe vanne d'isolement fermée, on ouvre lentement la vanne et qu'à l'arrêt on commence par fermer lentement la vanne avant d'arrêter la pompe. Dans ce cas, l'antibélier doit être branché après la vanne.

4.10.1 Pompes

Les groupes électropompes de forage sont de deux types :

– **Les groupes dits « de forage »** où le moteur est situé en surface et où la pompe est immergée dans le forage, à la verticale du moteur. La transmission entre le moteur et la pompe s'effectue par un train de tiges centré au milieu de la colonne montante et guidé par des paliers situés à la jonction des tubes de la colonne montante et lubrifié à l'eau sous pression. L'ensemble de la colonne montante et de la pompe est supporté par le châssis du moteur.

– **Les groupes dits « immergés »** où moteur et pompe sont immergés et débitent directement dans la colonne montante formée seulement de tuyaux. Ce dernier type de groupes a tendance à être de plus en plus employé en raison de sa simplicité de montage et de démontage *(photo II.3.8)*.

4.10.2 Equipements annexes

La colonne montante est constituée de tubes (en général de 3 ou de 6 m de longueur) assemblés selon la place disponible dans le forage, soit par des brides soudées aux tubes, soit par des manchons taraudés se vissant sur les extrémités filetées des tubes. La première solution est la moins délicate et est utilisée dès que le diamètre du forage le permet. Le diamètre de la colonne montante est fixé par celui du forage dans les forages de petit diamètre ou par une vitesse maximale inférieure à 2 m/s dans les autres cas. Les tubes sont généralement en acier de forte épaisseur (API 5L de 4 mm à 10 mm suivant le diamètre) pour des raisons de longévité face aux attaques de la corrosion plus que pour des raisons de chimique. Il est recommandé de les revêtir extérieurement d'une peinture bitumineuse.

La colonne montante est supportée à sa partie supérieure par le châssis du moteur pour les groupes « de forage », par un châssis en profilés d'acier soudé au tubage ou reposant sur la section de rétrécissement du forage pour les groupes « immergés ». Dans tous les cas, il faut veiller à laisser au-dessus de la colonne un espace suffisant pour la remonter à l'aide d'un derrick installé au-dessus du forage ou à l'aide d'une grue.

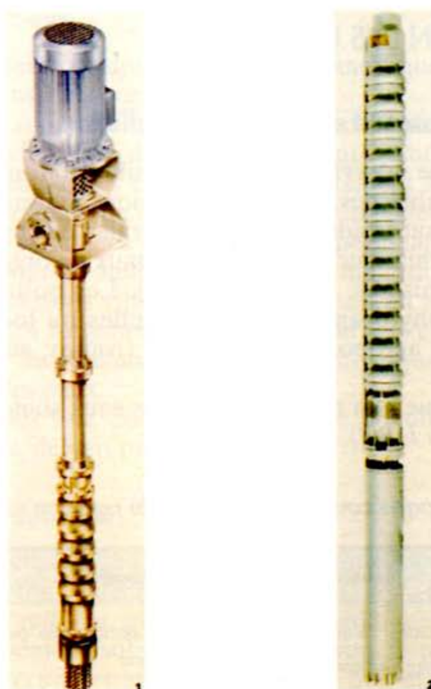


Photo II.3.8 — *Groupe de forage (1) et immergé (2) (document Pompes Guinard)*

Tout groupe de forage doit être protégé contre le désamorçage. Cette protection peut être :

– Une sonde de niveau immergée à 1 ou 2 m au-dessus du niveau de désamorçage.

– Une protection purement électrique par ampèremètre à seuil arrêtant le groupe dès que l'intensité consommée diminue.

L'eau extraite d'un forage est normalement une eau claire qui permet l'utilisation des compteurs d'eau classiques pour la mesure des débits. Les débits mesurés étant relativement peu variables, on peut se contenter de compteurs de faible sensibilité. Ces compteurs sont généralement des compteurs de type Woltmann (hélice d'axe parallèle à celui du courant introduite dans l'écoulement) sensibles au mouvement de vortex de l'eau. Il est donc recommandé de prévoir à l'amont une longueur droite de conduite égale à au moins 5 diamètres du compteur (cette longueur doit être précisée dans les années à venir par une norme actuellement à l'étude). Le compteur étant d'un accès généralement difficile, il est prudent de l'équiper d'un émetteur d'impulsions et de reporter ainsi son index dans un endroit d'accès faible.

Lorsque la conduite d'exhaure issue du forage est courte, le réservoir antibélier est inutile. Si elle est longue et qu'elle fait partie d'un réseau d'exhaure commun à plusieurs forages, l'étude de l'antibélier est identique à celle de tout antibélier de station de pompage. L'exploitant a intérêt, chaque fois que cela est possible, à utiliser des réservoirs antibéliers où l'eau est séparée de l'air par une membrane. Ces réservoirs permettent d'éviter le compresseur d'air de remplissage avec habituellement son automatisme de fonctionnement.

L'utilisation des groupes immergés et des réservoirs antibéliers à membrane permet d'éviter l'édification des cabines de forages en les remplaçant par des ouvrages enterrés de faibles dimensions.

5 PROTECTION DES NAPPES

5.1 Principales causes et catégories de pollution

L'action humaine intervient de façon sensible pour modifier les quantités disponibles et la qualité des eaux. Les pollutions induites sont d'ordre physique (eaux chaude ou froide, matières minérales ou organiques en suspension, radioactivité), chimique (polluants minéraux ou organiques), bactériologiques (micro-organismes, virus, bactéries). Les pollutions sont diffuses (engrais, produits phytosanitaires), ponctuelles ou localisées (stockages, décharges, puisards, aéroports) ou linéaires (routes, autoroutes, voies ferrées).

Les pollutions que l'on rencontre dans les eaux souterraines sont de plusieurs ordres *(tableau II.3.4)*.

Tableau II.3.4 — *Principales causes et catégories de pollution*

	Localisées	Linéaire	Diffuse
Pollution accidentelle ou occasionnelle	Accident de transport. Rupture de conduite. Rupture de stockage de produits chimiques et pétroliers. Accident industriel, guerre, sabotage.	Pollution accidentelle de cours d'eau	Pollution atmosphérique, accidentelle massive. Pollution des sols. Inondation. Rupture de digue.
Pollution chronique	Ouvrages de captage défectueux. Puisards, puits perdus. Lagunage des bassins non étanches. Décharges, terrils, dépôts mal conçus. Installations industrielles mal conçues. Rejets souterrains.	Réalimentation de nappe par des cours d'eau pollués. Infiltration des eaux de ruissellement du réseau routier. Fuite de réseau d'assainissement. Fuite de conduites de produits industriels. Intrusion d'eau marine. Désherbage chimique.	Epandage agricole mal conduit. Mauvaises pratiques culturales. Rejet souterrain d'eau de drainage agricole. Pollution atmosphérique chronique. Assainissement domestique autonome mal conçu et mal exploité. Cuves individuelles de fuel domestique.

Les pollutions peuvent avoir un **caractère permanent** (épandage de fertilisant, site de décharge ou de stockage non étanche) ou **accidentel** (rupture de pipeline ou de cuve, accident de transport routier ou ferroviaire, fluvial, ...). Il convient également de distinguer les **pollutions actuelles** dues à des activités présentes, des **pollutions historiques** provoquées par des stockages, des activités ou des accidents anciens (friches industrielles, terrils, décharges). Beaucoup de pollution révélées aujourd'hui sont liées à des pollutions historiques alors que la prise de conscience et la police des eaux étaient insuffisantes.

5.1.1 La pollution urbaine

La pollution urbaine comprend les rejets domestiques solides et liquides et les déchets des industriels non raccordés.

L'imperméabilisation des chaussées et la densité de construction réduisent sensiblement l'infiltration dans les villes, ce qui peut abaisser localement le niveau de certaines nappes et augmenter fortement les débits de surface des eaux de pluie entraînant un coût élevé pour leur collecte.

L'utilisation de chaussées ou de parkings perméables peut réduire ce phénomène gênant pour les aménageurs des agglomérations.

Le développement des villes et des industries, en augmentant les eaux utilisées et leur rejet, a fortement modifié le cycle de l'eau, créant des zones de déséquilibre pour les réseaux en quantité et provoquant une forte perturbation de la qualité des eaux.

Les eaux pluviales sont également causes de pollution, en lessivant toitures, parking, voiries, déblais puis en s'infiltrant.

5.1.2 La pollution industrielle

La pollution industrielle peut avoir des causes variées : les plus fréquentes étant les dépôts de déchets ou les bassins d'eau de lavage ou de traitement de l'industrie minière, métallurgique ou chimique, qui ont été placés, sans précautions, à même le sol sur des terrains trop perméables. On estime à 1 000 le nombre de crassiers en France sur site non étanche, ou encore de complexes chimiques, raffineries, papeteries, industries alimentaires dont les installations de stockage ou de transport de leurs produits et déchets peuvent donner lieu à des pollutions chroniques ou accidentelles.

Notons que le génie chimique a produit des polluants organiques naturels ou synthétiques au rythme de 1 000 composés nouveaux par an dans les dix dernières années (plus de 70 000 composés nouveaux couramment utilisés). Parmi eux, **les pesticides**, les **composés organiques volatils**, les **solvants** industriels jouent un rôle particulièrement important.

L'industrie extractive de matériaux, bien qu'elle ne soit pas polluante en elle-même, perturbe les équilibres naturels et créée des **zones vulnérables** (**ballastières** ou gravières). Enfin, dans bien des cas elles **ont été remblayées par des déchets de matériaux de démolition non inertes**, créant ainsi des pollutions importantes. Dans la seule plaine d'Alsace on dénombre près de 4 000 lacs de gravières. Les vallées de la Seine et de ses principaux affluents (Eure et Oise) situées dans les zones de besoins en granulats de la région parisienne ont terriblement souffert de ces exploitations souvent anarchiques.

5.1.3 L'agriculture

La pollution agricole peut être diffuse par l'épandage de produits fertilisants et phytosanitaires, dont l'utilisation a doublé en 20 ans, et par le lisier d'élevage. Cette pollution est souvent due à de mauvaises pratiques culturales (excès d'élément fertilisant, sols dénudés en hiver, fragilisation des sols par des méthodes culturales trop agressives).

La croissance régulière, dans les principaux aquifères, des teneurs en nitrates depuis plus d'une vingtaine d'années est devenue un problème préoccupant pour les administrations chargées de la gestion des eaux et les exploitants d'eau *(figure II.3.15)*. Une meilleure conduite agronomique peut être obtenue par quelques pratiques essentielles à la gestion de l'azote. On estime que ces « bonnes pratiques culturales » permettraient de réduire la perte de

nitrate vers la nappe de 20 kg à l'hectare, soit une diminution d'environ 30 % des apports actuels.

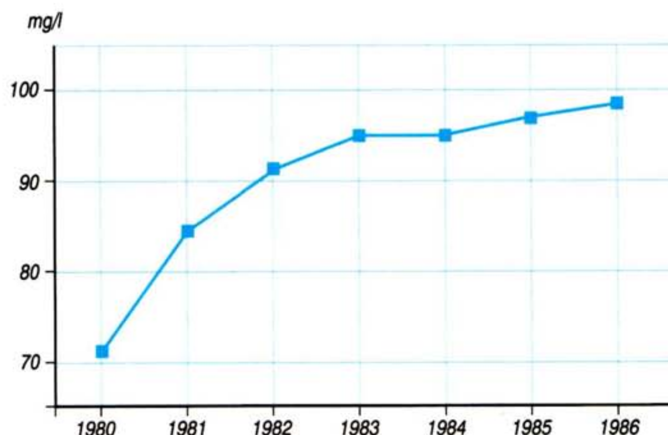


Figure II.3.15 — *Evolution des teneurs moyennes en nitrates dans les nappes du nord-Finistère (19 captages en zone légumière). D'après doc. BRGM*

L'exemple de la source de Liocourt illustre bien **l'influence de l'occupation des sols et des pratiques culturales** sur la teneur en nitrates dans les eaux souterraines. Avant 1963, la butte de Liocourt était en friche. Elle a été mise en culture sur une soixantaine d'hectares. Les teneurs en nitrates sont alors passées de 10 mg/l à 125 mg/l en 1980. Le graphique de la figure II.3.16 montre clairement la relation entre épandage de lisier et augmentation des teneurs en nitrates, puis l'influence de l'arrêt de cette pratique en 1982. Depuis 1989, pour améliorer la situation, un tiers du bassin d'alimentation a été **mis en herbe**.

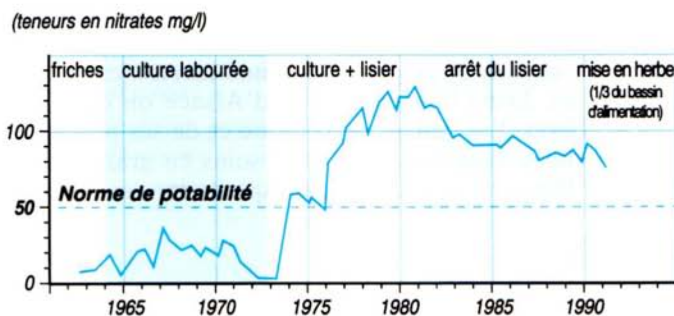


Figure II.3.16 — *Exemple de l'influence des pratiques agricoles sur la teneur en nitrates des eaux souterraines – source de Liocourt (57). D'après document AE Rhin-Meuse*

5.1.4 Les cours d'eau et les réseaux de transport

Le déversement chronique ou accidentel de substances nocives dans les cours d'eau (suite à un incendie en milieu industriel, accident de la navigation fluviale,...) sont à l'origine de cas très graves. Les eaux polluées pouvant s'infiltrer à travers les berges (échanges rivière-nappe).

Le curage des canaux et des cours d'eau navigables pollue par le stockage de boues contaminées ou en créant des pertes dans le lit.

L'infiltration des eaux pluviales routières et autoroutières pollue par le sel, les métaux, l'amiante, les hydrocarbures, qu'elles lessivent sur les chaussées.

Les cuves de stations services ne sont pas toujours étanches. On dénombre par ailleurs 6 000 stations services fermées en 5 ans et actuellement dans des conditions de sécurité douteuse.

Les aérodromes, les voies ferrées (traitées à l'atrazine) ont également provoqué des pollutions historiques importantes.

Enfin, les réseaux de transport sont le siège de nombreuses pollutions accidentelles ferroviaires et routières, ou par rupture de pipelines.

5.1.5 La surexploitation de nappe

La surexploitation des nappes résultant des besoins accrus des usagers, abaisse leur niveau ; elle modifie les échanges rivières-nappes, d'où des désordres divers (salure dans les estuaires par exemple).

La réalimentation de nappes peut jouer un rôle inverse et aider ainsi, en intervenant sur le stock, à une régularisation saisonnière.

5.2 Les périmètres de protection

Le captage d'eau souterraine est un élément essentiel de l'alimentation en eau potable des populations. Il joue un rôle socio-économique très important et sa défaillance a toujours des conséquences immédiates. A ce titre, la protection, l'entretien et le suivi de l'ouvrage constituent autant de points clés dans sa gestion. Une fois le forage réalisé, il convient de le protéger contre toute source de pollution extérieure.

La vulnérabilité des nappes aux diverses pollutions est conditionnée par plusieurs facteurs :

- le pouvoir filtrant du réservoir,
- l'épaisseur de la zone non saturée du réservoir,
- la vitesse d'écoulement des eaux souterraines : elle intervient sur les phénomènes de dilution, dégradation et fixation de certains produits polluants,
- la protection naturelle de l'aquifère : la présence au-dessus de la nappe d'une couche imperméable assure une protection naturelle efficace contre les pollutions de surface,
- le type de nappe : les nappes libres sont plus vulnérables que les nappes captives moins accessibles.

La détermination des périmètres de protection des captages d'eau potable est un acte dont les conséquences peuvent être importantes pour la collectivité, tant sur le plan sanitaire qu'économique. Cette étude est longue et complexe. Elle doit être effectuée par un hydrogéologue agréé en matière d'hygiène publique.

Les périmètres proposés doivent assurer une sécurité optimale pour la protection des eaux distribuées sans pour autant avoir une extension excessive, incompatible avec les contraintes de coût.

On distingue une zone de protection immédiate, une zone de protection rapprochée et une zone de protection éloignée.

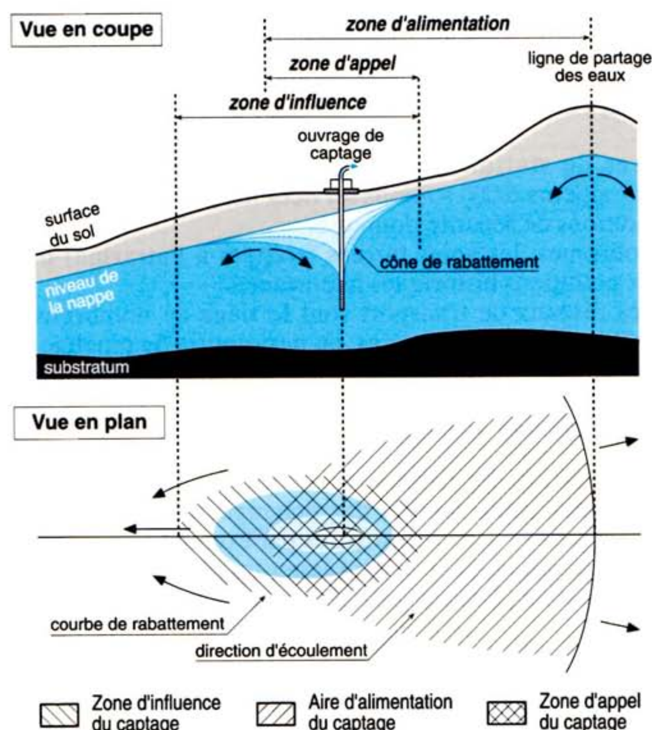


Figure II.3.17 — *Schéma d'un pompage en milieu poreux (d'après document du BRGM)*

• **Le périmètre de protection immédiate** a pour fonction d'empêcher la détérioration des ouvrages de prélèvement et d'éviter que des déversements ou des infiltrations de substances polluantes se produisent à l'intérieur ou à proximité immédiate du captage.

• **Le périmètre de protection rapprochée** doit protéger efficacement le captage vis-à-vis de la migration souterraine des substances polluantes. Il est déterminé en fonction :

– des caractéristiques de l'aquifère et de l'écoulement souterrain,
– du débit maximal du forage,
– du pouvoir de fixation et de dégradation du sol et du sous-sol vis-à-vis des polluants,
– du pouvoir de dispersion des eaux souterraines,
– de l'importance du rabattement du niveau d'eau lors du pompage,
– de la durée et de la vitesse de transfert de l'eau entre les points d'émission de pollutions possibles et le point de prélèvement dans la nappe *(figure II.3.16)*.

• **Le périmètre de protection éloignée** prolonge éventuellement le précédent pour renforcer la protection contre les pollutions permanentes ou diffuses.

5.3 Les actions de l'exploitant

La procédure de définition des trois périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine doit s'appuyer sur une étude hydrogéologique et environnementale approfondie, effectuée à la diligence du maître d'ouvrage.

L'étude du dossier technique est confiée à un hydrogéologue agréé par le Ministère de la Santé. Dans le cas de nouveaux captages il est vivement recommandé d'associer cet expert au niveau de l'avant projet de manière à éviter certaines situations délicates.

On notera que, si le contenu du dossier technique est jugé insuffisant, l'hydrogéologue agréé refusera de se prononcer et demandera des études complémentaires. Ainsi est-il recommandé de réaliser un « **cahier des charges** » qu'il convient de soumettre à l'hydrogéologue agréé mais aussi au représentant du service instructeur (DDASS, DDAF, DDE) qui sera rapporteur du dossier au Conseil Départemental d'Hygiène. Enfin, pour les captages qui participent à l'alimentation de plus de 50 000 habitants le dossier doit passer par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France et il convient que le dossier soit le plus complet possible de manière à ne pas suggérer à cette haute assemblée des études complémentaires.

Pour les captages anciens, si les études démontrent que l'ouvrage est trop vulnérable, ou donne des signes de contamination, il est préférable de renoncer à sa protection qui entraînera une procédure longue, coûteuse et probablement inutile. Dans l'attente de son déplacement ou de sa réhabilitation il convient de mettre en place un renforcement des contrôles de qualité, voire un dispositif de surveillance de la qualité des eaux brutes.

Enfin, la **procédure de déclaration d'utilité publique** (DUP) est obligatoire, longue et coûteuse aussi convient-il de bien s'y préparer (cf. *annexe II.3.1,* Législation française dur la protection des captages).

6 GESTION DES PRÉLÈVEMENTS ET CHOIX ENTRE EAU DE RIVIÈRE OU EAU DE NAPPES

Le choix de la ressource est l'objet de nombreuses controverses entre les partisans des eaux souterraines (mieux protégées et de qualité constante), et des eaux de surface (traitables à bon compte).

Nous donnons, ci-dessous, des éléments de réflexions quant au choix de cette alternative, qui devraient permettre un choix réaliste.

6.1 Nouveauté du débat

Le débat est relativement nouveau, car, historiquement, l'alimentation en eau au robinet a d'abord fait appel à des eaux de source ou à des eaux souterraines jugées mieux protégées contre les nuisances et les souillures qui caractérisaient les rivières. Quelques graves épidémies à la fin du 19e siècle dans plusieurs villes européennes ont privilégié fortement la ressource souterraine, qui peut être utilisée sans traitement. Cela favorisait l'eau souterraine jusqu'à ce que se développent, à partir de 1900, les techniques de traitement des eaux de surface.

Actuellement, bien souvent lorsqu'une ressource en eau souterraine existe localement en quantité suffisante, l'alimentation en eau de la (ou des) commune(s) voisine(s) est basée sur son exploitation. Si celle-ci est insuffisante ou inexistante, le choix s'opère entre la mobilisation et le transport d'eau souterraine disponible plus loin et le traitement d'eau superficielle locale. Très souvent, pour les communes rurales et les agglomérations petites et moyennes, l'intérêt économique fait pencher vers l'eau souterraine car la longueur de l'adduction entre le champ captant et l'utilisation reste courte.

Par contre, pour les plus grosses agglomérations, une fois épuisées les ressources souterraines locales ou proches, les besoins supplémentaires sont couverts par de l'eau superficielle traitée.

A titre d'exemple, le tableau II.3.5 illustre le cas du bassin Seine-Normandie.

Tableau II.3.5 — *Provenance l'eau dans le bassin Seine-Normandie (d'après document de l'AESN)*

Usage	Volume total prélevé (10^3 m^3)	Eau souterraine (10^3 m^3)	% du volume	Eau superficielle (10^3 m^3)	% du volume
Alimentation en eau potable	1 555 818	937 743	60,3	618 075	39,7
Industries	964 595	306 509	31,8	658 086	68,2
Total bassin	**2 520 413**	**1 244 252**	**49,4**	**1 276 161**	**50,6**

6.2 Avantages et inconvénients des nappes

Par rapport aux eaux de surface, **les eaux souterraines présentent souvent plusieurs avantages :**

– **un caractère extensif et une accessibilité** qui en font une ressource appropriée aux utilisations dispersées, notamment pour les petits villages et les fermes ;

– **des coûts de captages et de traitement moins élevés** et de dépenses énergétiques d'exploitation souvent nulles (captages gravitaires) ou minimes (pompages à faible profondeur) ;

– **des garanties de ressources** (faibles variations saisonnières et interannuelles, garantie de réserve) ;

– **une régularité de température** et de qualité ;

– **une meilleure protection vis-à-vis des polluants** entraînés lors des forts épisodes pluvieux et des pollutions accidentelles (**Detay M.** [réf. 19]).

Lorsqu'elles sont polluées, le nombre de polluants est limité. Par contre, lorsque les pollutions diffuses ou ponctuelles atteignent les eaux souterraines, le facteur temps est important. Par rapport aux eaux de surface, les aquifères présentent l'avantage que l'évolution d'une pollution soit plus lente. En revanche, les mesures de décontamination n'ont pas d'effet immédiat, et la dégradation de la qualité peut être très persistante, voire définitive. En effet, contrairement aux idées encore trop répandues, les nappes souterraines libres ne sont pas invulnérables aux contaminations d'origine agricole, industrielle ou urbaine. Ces dernières années, plusieurs centaines de captages d'eau destinée à la consommation humaine ont dû être abandonnées définitivement : le plus grand nombre, du fait de teneurs en nitrates très supérieures à la norme, mais beaucoup aussi à la suite de pollutions accidentelles par des hydrocarbures, des solvants organiques ou des métaux indésirables. Cet état de fait a, d'une part, des incidences économiques négatives importantes par les coûts des investissements (déplacement de captages, interconnexion de réseau, usine de traitement), et d'autre part, dans certaines régions où les nappes sont particulièrement polluées, il devient de plus en plus difficile de trouver des zones de bonne qualité et certains champs captants deviennent irremplaçables.

Tableau II.3.6 — *Principales différences entre les eaux de surface et les eaux souterraines*

Caractéristiques	Eaux de surface	Eaux souterraines
Température	variable selon la saison	relativement constante
Turbidité	variable, parfois élevée	faible ou nulle
Couleur	liée surtout aux matières en suspension (argile, algues)	liée surtout aux matières en solution (acides humiques)
Minéralisation globale	variable en fonction des terrains, des rejets ou des précipitations	constante mais en général plus élevée que dans les eaux de surface de la même région
Fe, Mn dissous	généralement absents	généralement présents
CO_2 agressif	généralement absent	souvent présent en quantité
O_2 dissous	le plus souvent proche de la saturation. Absent dans les eaux très polluées	absent la plupart du temps
H_2S	généralement absent	souvent présent
NH_4	présent seulement dans les eaux polluées	présent fréquemment sans être un indice de pollution
Nitrates	peu abondants en général	teneur parfois élevée
Silice	teneur en général faible	teneur souvent élevée
Micropolluants minéraux et organiques	souvent présents mais peuvent disparaître assez vite après suppression de la source	généralement absents mais une pollution accidentelle subsiste plus longtemps
Eléments vivants	bactéries, virus, plancton	ferrobactéries fréquentes
Solvants chlorés	rarement présents	souvent présents

Enfin, la qualité d'une eau souterraine peut être très variable au sein d'un même champ captant. Globalement, elle est de meilleure qualité que l'eau de surface en terme bactériologique, turbidité et concentration en matière organique. Cependant elle a une plus forte concentration en minéraux.

Les eaux de surface proviennent de rivières, lacs, barrage réservoir, etc. Leur localisation géographique peut être un avantage en terme de traitement et de distribution si l'adduction peut être gravitaire. Cependant, sur le plan qualitatif, les captages d'eau superficielle nécessitent toujours un traitement.

Les rivières et canaux sont caractérisés par des changements rapides sur le plan qualitatif. En période de forte pluies ils sont le siège de changements très rapides en terme de turbidité et nécessitent des capacités de traitement adaptés et une surveillance accrue. Par ailleurs, les rivières sont sensibles aux risques de pollution et une contamination de l'usine de traitement peut être très rapide.

Les lacs et retenues sont caractérisés par des changements saisonniers de la qualité de l'eau bien que ces changement soient beaucoup plus lents et de nature différente que ceux des rivières. Pendant l'été les lacs sont stratifiés en raison de la température de l'eau. Ceci entraîne une diminution de l'oxygène dissous en profondeur. Ces conditions réductrices rendent possible la solubilisation du fer et du manganèse. Des problèmes de goût et odeur peuvent alors apparaître. Les blooms algaux sont également cause des variations de turbidité, de goûts et odeurs, d'alcalinité, de pH, etc.

Enfin, les eaux superficielles sont, bien évidemment, sensibles aux conditions environnementales en terme d'utilisation des sols, de topographie, de végétation, etc.

Le tableau II.3.6 résume les principales différences entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

6.2.1 La notion de réserve

Un des avantages de l'eau souterraine réside dans le fait qu'elle est associée étroitement à la notion de stock. On puise dans **une réserve que l'on peut gérer comme un réservoir**. La réalimentation artificielle de nappe participe à cette volonté de gérer l'aquifère, en termes qualitatifs et quantitatifs, comme un réservoir. **L'utilisation de modèles de nappe permet également une optimisation financière, quantitative et qualitative** des prélèvements (**Detay M.** [réf. 20]).

Cette faculté de pouvoir puiser temporairement dans les réserves des nappes constitue un facteur de sécurité primordial dans l'approvisionnement ment en eau.

A l'échelle annuelle, elle permet de satisfaire **la demande de pointe qui se produit en général à une époque où les rivières sont déjà en étiage prononcé**, et où la dilution de la pollution est faible.

A l'échelle pluriannuelle, elle autorise la demande des prélèvements. malgré des séries d'années déficitaires successives. On a constaté en France à l'occasion de la forte sécheresse de 1976, qui a succédé aux années sèches de 1971 à 1974 avec une année moyennement humide en 1975, que les champs captants ont été peu affectés.

L'observation des niveaux piézométriques sur la période 1970/1978 montre clairement qu'il a suffi d'une année à pluviométrie excédentaire, 1977, pour que la recharge des aquifères soit complète.

On observe *(figure II.3.18)* les effets d'une succession d'années à alimentation déficitaire par rapport à la moyenne et le rétablissement d'une seule année excédentaire en 1977.

Un autre avantage de l'eau souterraine se trouve dans son étendue géographique qui permet souvent de disperser les captages et d'économiser sur les adductions en réalisant un forage pour chaque groupe d'utilisateurs. Mais cela peut se transformer en inconvénient si les besoins locaux sont supérieurs au débit unitaire du captage, la dispersion des prélèvements nécessite alors un réseau de collecte coûteux entre les points de prélèvement.

6.2.2 La qualité des eaux souterraines et superficielles

Sur le plan de la qualité, l'effet de stock participe à la régulation qualitative des eaux souterraines, comme on a pu le constater pendant la sécheresse de 1976. Alors les variations des teneurs en éléments gênants (cas de l'ammoniac, *figure II.3.19*) des rivières étaient très fortes (2 ou 3 fois la moyenne), la variation des éléments perturbant la qualité des nappes, ne dépassait pas 10 ou 15 % et se produisait d'ailleurs avec un décalage de plusieurs mois.

Il faut remarquer, cependant, que cette inertie des nappes joue également en sens inverse : l'arrêt des flux de pollution rejetés dans un aquifère ne permet à la nappe de retrouver sa qualité initiale qu'après un temps long.

Les perturbations peuvent se poursuivre longtemps après l'arrêt de la pollution en surface, car le temps de migration dans le sol peut être de plusieurs années, comme l'ont montré diverses études sur le transfert des nitrates.

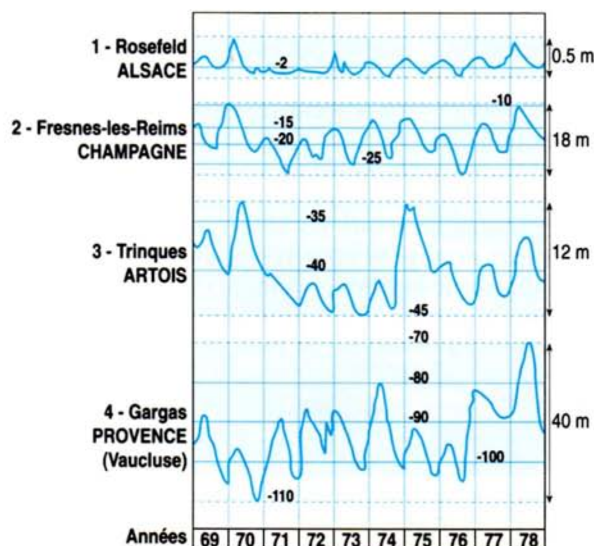


Figure II.3.18 — *Variation des niveaux de diverses nappes de 1969 à 1978*

Par ailleurs, une pollution massive des eaux souterraines arrive rarement brutalement : il est généralement possible de stopper les pompages avant que la pollution des eaux ait atteint un niveau critique. Notons qu'il s'agit d'arrêter de distribuer l'eau polluée mais qu'il convient de continuer à pomper à décharge pour évacuer la pollution.

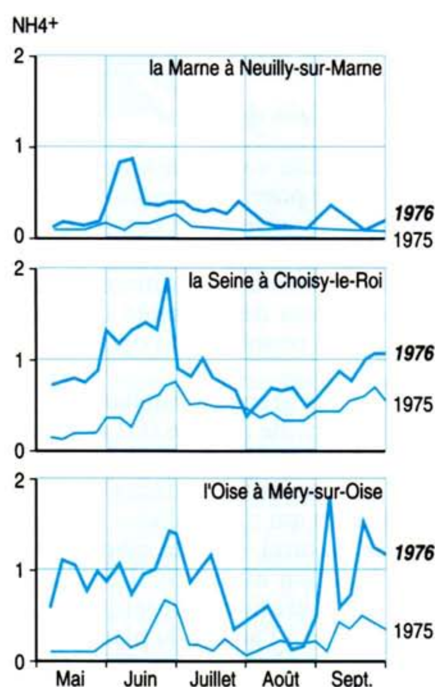


Figure II.3.19 — *Teneur en NH_4^+ de quelques rivières en région parisienne*

Le risque est différent pour le cas d'une prise en rivière : à moins d'une surveillance en continu de la qualité des eaux, une pollution accidentelle peut affecter un réseau entre deux contrôles de qualité, aussi fréquents soient-ils.

Pour améliorer encore cette « sécurité » des nappes, diverses dispositions doivent être prises pour protéger les nappes contre la pollution, notamment avec les périmètres de protection et la mise en œuvre de différents moyens de contrôle.

Il est en effet souhaitable que les réserves d'eaux souterraines, notamment alluviales, soient protégées pour rester disponibles dans le futur. C'est en effet dans les vallées que le développement de l'urbanisation, de l'industrie et des exploitations de granulats fait peser les menaces les plus lourdes sur l'eau souterraine, non seulement sur le plan de la qualité mais également de la quantité.

6.2.3 La minéralisation des nappes

Généralement les teneurs en sels dissous sont suffisamment faibles pour garder aux eaux souterraines leur caractère de potabilité. Cependant, certaines propriétés des eaux souterraines, et ceci en l'absence de toute pollution, peuvent gêner certains de ses usages. Ce sont essentiellement :

– la dureté : teneur trop élevée en calcium et magnésium entraînant l'entartrage des conduites et des machines ;

– les teneurs en fer et manganèse, provoquant des colorations et des dépôts gênants.

L'eau doit alors subir des traitements physico-chimiques appropriés : adoucissement, déferrisation, dégazage, neutralisation, etc.

Enfin les qualités bactériologiques doivent être conservées tout au long du transport dans des réseaux, ce qui impose souvent de pratiquer au départ un traitement de stérilisation.

6.2.4 La réalimentation artificielle de nappe

La réalimentation artificielle vise à un accroissement de la ressource et consiste à recharger une nappe pour compenser l'effet de la dépression piézométrique liée à l'exploitation intensive de l'aquifère. Ce procédé de « gestion rationnelle d'un réservoir naturel » permet de stocker dynamiquement des ressources et de les réutiliser dans des conditions de régime et de qualité différents. Il permet la modification de la qualité de l'eau, la restauration d'un équilibre, l'accroissement de la ressource et l'optimisation du régime d'exploitation (**Detay M.** [réf. 10]).

En région parisienne deux grandes installations (Croissy-sur-Seine avec 150 000 m^3/j et Flins-Aubergenville avec 36 000 m^3/j) contribuent à la gestion du réservoir souterrain *(photo II.3.9)*. L'eau est captée en Seine et subit un traitement comprenant microtamisage, décantation et filtration avant de rejoindre d'anciennes sablières qui sont utilisées en bassins de réalimentation. C'est au travers d'un « lit naturel » d'une cinquantaine de centimètres de sable que s'effectue la filtration avant que l'eau ne pénètre dans la zone saturée *(photo II.3.10)*. L'épuration biologique et chimique de l'eau en sablière est essentiellement due à l'action du plancton, de l'oxygène de l'air et du soleil. Le fond du bassin joue le rôle d'un filtre, l'eau ainsi débarrassée de ses plus grosses impuretés parachève sa purification et rejoint la nappe *(photo II.3.10)*.



Photo II.3.9 — *Réalimentation de nappe à Croissy. Les bassins d'infiltration plein et à gauche l'usine de traitement d'eau de Seine*



Photo II.3.10 — *Bassins de réalimentation vide pour nettoyage (Croissy). On voit le lit de sable*

On se rend compte que, bien que la technique de réalimentation par bassin soit assez répandue, sans doute en raison de l'apparente simplicité du procédé, son emploi, examiné de près, est fort complexe, dès que l'on cherche à se placer dans des conditions d'exploitation optimales. En effet, une étude d'optimisation de la réalimentation artificielle réalisée par Lyonnaise des Eaux montre à quel point le phénomène est complexe notamment en terme de colmatage. L'adaptation d'un projet d'aménagement aux conditions hydrogéologiques du site n'est qu'un préalable : il reste à étudier le colmatage, les moyens de le limiter, et toutes les conséquences sur l'entretien, dont les incidences financières pèsent sur la rentabilité de l'exploitation.

Le colmatage des bassins résulte principalement de la prolifération des algues, du dépôt de matières en suspension et des actions bactériennes sur les terrains.

6.3 Quelques éléments de décision

Ces remarques préliminaires sur les qualités respectives des eaux de rivières et des eaux souterraines ayant été faites, comment choisir ?

Dans une certaine mesure, le choix est facilité par les normes qui définissent la qualité requise pour une eau destinée à l'alimentation et par celles donnant les spécialisations des eaux des rivières propres pour la fabrication d'eau potable.

Compte tenu de la qualité des eaux souterraines et superficielles disponibles, **la comparaison doit donc pouvoir se faire sur des bases économiques**, tant pour les dépenses d'investissement que pour celles de fonctionnement. Il faut prendre en compte toutes les dépenses relatives aux différents ouvrages :

- captages,
- traitement,
- transport,

pour les projets alternatifs (eaux de surface et eaux souterraines transférées), compte tenu des traitements d'ajustement de qualité aux normes.

En réalité, si les comparaisons sont aisées pour les petites agglomérations, car les quantités d'eau nécessaires ne sont pas excessives et sont compatibles avec des ressources proches, le problème peut être très complexe pour les grandes agglomérations où il faut mobiliser des ressources considérables pour faire face aux besoins et aller les chercher loin.

On en trouvera ci-dessous deux exemples qui montrent les difficultés de la comparaison.

6.3.1 Cas d'une rivière très polluée

Il y a alors un premier choix à faire pour l'utilisation des eaux de rivière :

– Soit prélever l'eau de rivière dans l'état où elle est, ce qui oblige à des traitements très poussés.

– Soit préalablement au prélèvement, améliorer la qualité de l'eau de rivière par des actions antipollution.

Parfois, la seule solution possible est une amélioration préalable de la qualité de l'eau de surface ; par exemple, c'est ce qui arrive dans des rivières où certains paramètres, concernant des substances (métaux lourds par exemple) contenues dans l'eau de rivière, ne peuvent être ramenés à des valeurs compatibles avec la grille, par un traitement d'affinage.

Il faut donc que les alternatives envisagées fassent intervenir des actions extérieures aux chaînes de traitement et de transport : par exemple, la dépollution pour améliorer la qualité de la rivière.

La mise au point des schémas d'alimentation en eau de la région parisienne illustre bien la complexité de ces comparaisons. Il a fallu introduire de nombreux éléments extérieurs :

- barrages à réaliser pour améliorer les étiages ;
- effets sur la qualité des eaux de surface du développement économique à l'amont (par exemple, centrales nucléaires) et de la réduction des pollutions pour différents paramètres ;
- protection des nappes pour maintenir la qualité de celles-ci ou même les quantités disponibles (périmètres de protection).

6.3.2 Evaluation de la surprime à donner à l'eau la meilleure

L'ajustement à opérer sur les eaux de surface ou parfois sur les eaux souterraines pour les rendre compatibles avec la grille de qualité « eau potable »

ne conduit jamais à une qualité d'eau traitée identique. Quelle surprime doit-on alors donner à l'eau la meilleure et comment la définir ?

C'est de la difficulté de chiffrer un tel avantage que naissent les controverses que chacun connaît.

Quel est le prix correspondant à cette meilleure qualité, pour la santé ou même l'agrément du consommateur ? A mesurer le surcoût que paie volontiers le consommateur d'eau minérale pour des motifs peu raisonnés : protection de santé ou de goût, on pourrait penser que la surprime pour une « eau meilleure » pourrait être importante. Les distributeurs qui ont investis des sommes importantes pour diminuer les goûts désagréables : passage du chlore à l'ozone, incorporation de charbon actif en grain ou en poudre dans les filières de traitement, couplage ozone-peroxyde d'hydrogène, ont estimé que l'amélioration du goût justifiait un surcoût de plusieurs centimes par m^3.

Une évaluation théorique de la surprime consiste à prendre en compte la totalité ou une fraction du coût du traitement supplémentaire nécessaire pour porter la qualité de l'eau la moins bonne au niveau de la meilleure.

Mais ceci revient à accepter un surcoût pour une amélioration qui n'est pas indispensable sur le plan des normes. Un tel effort n'est sans doute pas une mesure antiéconomique si elle permet de garantir une qualité meilleure et de la faire connaître aux usagers afin que ceux-ci réduisent leur consommation d'eau minérale à leurs besoins réels de protection de la santé (eau prescrite par les médecins ou eau pour les bébés). L'utilisateur domestique dépense dans les villes françaises au moins autant pour l'achat d'eau minérale que pour l'eau au robinet, annuellement. Il serait encore *gagnant en payant une surtaxe* de 20 % *sur* une eau au robinet très améliorée, car il pourrait réduire fortement sa consommation d'eau minérale.

6.4 La modélisation

Quelque soit le choix de la ressource il convient d'appréhender le risque de pollution, de gérer la ressource sur le plan quantitatif et qualitatif et d'optimiser les coûts de production. De nombreux outils sont maintenant à notre disposition.

6.4.1 La modélisation des écoulements en rivière

Pour appréhender les risques de pollution et la propagation des pollutions en rivière, LE s'est doté d'un modèle répondant en région parisienne au nom de « POLLUX » (**Demongeot D.** [réf. 11] ; **Detay** [réf. 18]).

La modélisation de la vallée de la Seine a été effectuée sur environ 140 km : du barrage de Coudray à Gargenville, soit 40 km à l'amont d'Ivry sur Seine.

Le modèle hydraulique est fondé sur une schématisation de l'écoulement s'organisant autour de l'axe longitudinal de la vallée. Les lois d'écoulement sont régies par les équations complètes de Barré de Saint-Venant pour prendre en compte l'influence des barrages de navigation.

La complexité de l'écoulement en Seine et le souci de réaliser un calage hydraulique et dispersif précis nous ont conduit à lancer deux campagnes de traçage à la rhodamine sur le tronçon de la Seine compris entre Ivry et Gargenville soit sur une centaine de kilomètres. Ces campagnes de traçage ont été réalisées en période de basses et de moyennes eaux. Cette opération, renouvelée six fois, consistait à injecter à débit constant, pendant une demi-

heure, au milieu de la rivière, une quantité de traceur préalablement dosé et à suivre en divers points l'évolution de la concentration de la Rhodamine au cours du temps.

Sur chaque tronçon et pour les deux campagnes de traçage, cinq points de mesures judicieusement choisis ont permis de suivre l'évolution du panache. En ces cinq points, des prélèvements ont été effectués sur les rives droite et gauche, et au centre de la section. Les échantillons ont été récoltés toutes les 2 à 15 minutes d'intervalle et analysés au fur et à mesure au Centre International de Recherche Sur l'Eau et l'Environnement (CIRSEE). Ces cadences de prélèvements nous ont permis de reproduire fidèlement l'allure des concentrations aux divers points de mesure.

Le but n'étant pas de construire un modèle d'étude de la propagation des crues, seul le lit mineur (lit avant débordement) a été pris en considération. Néanmoins les bras les plus importants ont été modélisés à l'île de la Cité, l'île Saint-Louis, l'île Saint-Denis, l'île de Chatou, l'île d'Andrésy et l'île de Médan.

Les sections transversales ont été choisies de manière à représenter le plus fidèlement possible les variations de la géométrie (largeur et profondeur) du lit mineur de la Seine comme les résultats des tests le suggèrent.

Tous les profils n'étant pas datés de la même époque, certains d'entre eux ont été corrigés pour tenir compte de la mise à grand gabarit de la Seine. D'autres ont été reconstitués à partir des profils amont et aval existants.

L'outil développé a été réalisé après une analyse fine des tests de sensibilité et après de nombreux traçages. Ceux-ci ont permis une construction rationnelle du modèle qui prend en compte les barrages de navigation et les îles, particulièrement importantes pour appréhender correctement les phénomènes de dispersion longitudinale.

6.4.2 Les modèles de nappe

Les distributeurs d'eau utilisent depuis de nombreuses années des modèles de nappe. Ceux-ci ont considérablement évolué ces dernières années avec les capacités de calcul des calculateurs. Il est maintenant possible d'avoir des modèles extrêmement complexes hébergés sur des micro-ordinateurs type 486 (**Detay M.** [réf. 12]).

Les outils actuels intègrent l'hydrodynamique en régime permanent et transitoire, l'hydrodispersif, la réalimentation artificielle, les transferts rivière-nappe, les aspects qualitatifs avec notamment des cinétiques de transformation des corps chimiques intégrant l'adsorption, la désorption (**Müller O.** [réf. 13]), etc. Enfin, il est possible de valoriser ces modèles prédictifs avec des modules d'optimisation des coûts de production.

Les modèles d'optimisation intègrent le coût de l'exhaure mais également les caractéristiques physico-chimiques des différents forages permettant de garantir une eau brute de qualité constante aux usines de traitement (contrainte d'exploitation importante en cas de traitement biologique comme la nitrification, par exemple).

Récemment ces outils de modélisation ont intégré les effets de la réalimentation naturelle (transferts rivière-nappe) et artificielle, sur la qualité de l'eau de l'aquifère (**Detay M.** [réf. 14]). Il est ainsi possible de gérer au mieux le réservoir souterrain en tenant compte du temps de séjour de l'eau dans la nappe, de l'origine de l'eau et de sa qualité.

Ces modèles permettent, entre autre, de quantifier l'incidence des modes de culture sur la qualité de l'eau de l'aquifère (modélisation des teneurs en nitrates notamment) (**Emsellem Y.** [réf. 15]).

Des modèles spécifiques utilisant des systèmes experts permettent d'aider à la gestion des champs captants (**Santoni** [réf. 16] ; **Detay M.** [réf. 22, 23 et 24]).

Cependant, pour aussi performant que soit le modèle il faut le caler et sa pertinence sera d'autant plus pertinente que le modèle sera correctement calé. Il importe donc de collecter régulièrement des données sur les champs captants mais de bien les archiver. Ces données concernent (**Chambolle T.** [réf. 25]) :

– les paramètres quantitatifs – débit, niveau de nappe, pluviométrie, température, etc. ;

– les paramètres qualitatifs – analyses de l'eau, sources potentielles de pollution, etc. ;

– les données environnementales – hydrogéologie, géologie, topographie, occupation des sols, ...

6.5 La sécurité de l'alimentation en eau

La mesure de la sécurité de la distribution doit faire l'objet dans ces comparaisons d'un examen très attentif. On doit, en particulier, répondre aux questions suivantes :

Comment faire face aux difficultés dues à des pollutions accidentelles sur les rivières :

– rejets inopinés de produits dangereux ;

– accident de navigation, etc. ?

On doit pour cela, après avoir évalué le risque, déterminer le moyen de le réduire ou de l'annuler : bassins de stockage, de sécurité, interconnexion entre plusieurs sources d'alimentation.

Ce même risque ne doit pas être négligé pour les nappes et l'établissement des périmètres de protection et doit être pris en compte au niveau convenable.

Quelle garantie de services doit-on se fixer pour la desserte de l'usager (quel risque de défaillance et avec quelle période de retour) ?

Compte tenu du niveau fixé, l'intérêt d'une diversification des sources d'approvisionnement apparaîtra toujours nécessaire. La comparaison entre la régularisation des débits nécessaires sur la rivière grâce à des barrages et celle provenant d'une surexploitation passagère de la nappe assortie d'un traitement adéquat montrera que souvent la solution la plus économique est la seconde, notamment s'il s'agit de faire face à des besoins de pointe ou saisonniers.

Comme nous l'avons vu POLLUX est le premier maillon d'un ensemble d'outils informatiques de prévention et de gestion des situations de crise en cas de pollution en Seine. Il s'intègre dans une chaîne d'outils de gestion de la qualité des eaux brutes. Chaîne commençant par les stations d'observation de la qualité des eaux en rivière et en nappe, passant par les modèles de transfert de pollution en rivière, à la modélisation de l'effet de berge, couplée aux modèles hydrodynamiques et hydrodispersifs d'hydraulique souterraine.

Ce dispositif de suivi temporel, qualitatif et quantitatif mis en place par la LE permet une meilleure compréhension des phénomènes physico-chimiques, hydrauliques et biologiques des écosystèmes aquatiques. Il favorise la mise en place d'une gestion optimisée de la ressource en eau, en regroupant les aspects eaux souterraines – eaux superficielles – eaux de distribution, dans une action visant à préserver l'environnement (**Detay M.** [réf. 17] ; **Suzanne P.** [réf. 21]).

6.6 Conclusions

Ces diverses réflexions faites ici et celles du chapitre I.2 sur le cycle de l'eau tendent à montrer que les eaux de surface et les eaux souterraines ne sont pas concurrentes mais complémentaires. La stratégie de leur emploi doit combiner quantité et qualité et tenir compte des autres usagers qui souhaitent utiliser ces mêmes eaux : agriculture, industrie, tourisme, transport.

Le plan de répartition qui doit minimiser le coût global de la mobilisation des ressources ne peut pas faire l'objet de plusieurs programmes indépendants ; il devra être global et prendre la forme du schéma régional d'aménagement des eaux avec ses différents volets : alimentation domestique, assainissement, inondation, agriculture, industrie, hydroélectricité, etc.

BIBLIOGRAPHIE

1. **Doussan C., Toma A., Paris B., Poitevin G., Ledoux E., Detay M.,** 1993, *Coupled use of thermal and hydraulic head data to characterize river/groundwater exhanges,* Journal of Hydrology, 1994, n° 153, p. 215-229.
2. **Detay M., Doussan C., Grenet B., Ledoux E., Poitevin G., Picat P., Vignier V.,** 1992 (c), *Etude qualitative et quantitative de l'effet de berge – application à la nappe alluviale de Flins – Aubergenville,* Actes des XXII[e] Journées de l'Hydraulique, Paris, 15-17 septembre 1992, question 3, conférence n° 14.
3. **Poitevin G., Doussan C.,** *Etude des transferts de micropolluants Seine-nappe alluviale : Premiers résultats,* Rapport Ecole des Mines (CIG) Fontainebleau/Lyonnaise des Eaux, 43 p., 1991.
4. **Brodard E., Leprince, Fiessinger,** 1986, *Stochastic Modelling of a potable water treatment plant,* Colloque « Eau et informatique », mai 1986, Paris.
5. **Laverty J.,** *Techniques de restauration de la qualité des eaux des lacs et retenues,* L'eau, l'industrie, les nuisances, 1990, n° 139, p. 66-69.
6. **Morin D.,** 1990, *Techniques de restauration de la qualité des eaux des lacs et retenues,* Actes du colloque « La gestion de l'eau », ENPC, 4-6 décembre 1990, pp. 308-321.
7. **Rosenbaum V.,** 1992, *Gestion et entretien des plans d'eau,* Doc. LED-CIRSEE.
8. **Castany G., Margat J.,** *Dictionnaire français d'hydrogéologie,* BRGM, 1977.
9. **Detay M.,** 1993, *Le forage d'eau, réalisation, entretien, réhabilitation,* Masson Ed., 400 p.
10. **Detay M.,** 1993, *The use of artificial recharge to improve groundwater quality and quantity : the Lyonnaise des Eaux-Dumez experience,* Proceedings of the International Workshop : Groundwater quality and quantity and water supply in Lithuania – Vilnius, Druskininkai, pp. 18-19.
11. **Demongeot D., Lahoud A., Detay M., Suzanne P.,** 1992, *Outils informatiques de prévention et de gestion des situations de crise en région parisienne,* Colloque « L'eau dans la ville », HYDROTOP 92, Marseille, 7 au 10 avril 1992.
12. **Detay M., Poyet P.,** *La place de l'informatique dans les géosciences, évolution et perspectives,* Géologues, 1991, p. 37-48.
13. **Muller O., Detay M.,** 1993, *Modélisation du comportement des éléments azotés en aquifère alluvial influencé : importance de l'interface surface-nappe,* Hydrogéologie, 1993, n° 1, p. 3-19.
14. **Detay M., Suzanne P., Retali D.,** *Groundwater resources management : the Lyonnaise des Eaux-Dumez experience,* Proceedings of the Urban Water Conservation Technology Seminar, Shamian, Guangzhou, China, 1993.

15. **Emsellem Y., Detay M., Alla P., Suzanne P.,** *A model for self-purification of nitrates in ground water – Example of the Ansereuilles aquifer (France),* Abstract International Geological Congress in Washington DC, 1989, n° 3, 3-467.

16. **Santoni A., Sobral R., Fontaine P., Brodard E.,** *Les systèmes experts, nouveaux outils pour le traitement d'eau,* Water supply, 1988, n° 112, p. 181-188.

17. **Detay M., d'Arras D., Suzanne P.,** 1992, *La gestion des ressources en eau souterraine en région parisienne Ouest,* La Houille Blanche, n° 4, p. 295-308.

18. **Detay M., Lahoud A., Retkowsky I.,** *La gestion de crise en cas de pollutions accidentelles en Seine : les outils de la sécurité,* Actes des XXII[e] Journées de l'Hydraulique, Paris, 15-17 septembre 1992, question 3, conférence n° 14.

19. **Detay M.,** *Techniques modernes d'action sur les eaux souterraines, bilan et perspectives.* Rapport Général de la Question II des XXI[e] Journées de l'Hydraulique, Colloque de la Société Hydrotechnique de France, 1991, G.G.II.1-13.

20. **Detay M.,** *Advanced groundwater resources management : the Lyonnaise des Eaux–Dumez experience,* 29th International Geological Congress Kyoto, 24 August, 3 September 1992.

21. **Suzanne P., Detay M., d'Arras D.,** 1993, *Safeguarding the water supply during a major crisis : from prevention to crisis management – technical and operational aspects,* Proc. 19[e] Congrès de l'AIDE, Budapest, SS 12, pp. 11-13.

22. **Detay M., Poyet P.,** *Introduction aux méthodes modernes de maîtrise de l'eau,* Hydrogéologie, 1990, n° 1, p. 3-25.

23. **Detay M., Poyet P.,** *Application of remote sensing in the field of hydroengineering geology : the artificial intelligence approach,* Proceedings of the International Symposium Remote Sensing and Water Resource, Enschede, 20-24 August 1990, p. 849-858.

24. **Detay M., Poyet P.,** *HYDROLAB, an expert system for groundwater exploration and exploitation,* International Journal of Water Resources Development, 1990, vol. 6, n° 3, p. 187-200.

25. **Chambolle T., Detay M., Suzanne P.,** *Regard rétrospectif et prospectif sur l'hydrogéologie à l'aube du troisième millénaire,* Colloque « L'hydrogéologie au XXI[e] siècle », Académie des sciences, Paris, 24 novembre 1993, 810 p.